



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

**COSTO DE OPORTUNIDAD EN LA UTILIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE  
DESPACHO EN MINERÍA A CIELO ABIERTO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

CRISTIAN JOSÉ POBLETE MATAMALA

**PROFESOR GUÍA:**

CHRISTIAN MOSCOSO WALLACE

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

FELIPE AZOCAR HIDALGO

MARIO SOLARI MARTINI

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL 2010

## Resumen

En la industria minera la planificación sustenta la renta posible de capturar a través de la explotación de un recurso natural, según los lineamientos de cada empresa. Las directrices de una operación de extracción, deben ser eficaces y eficientes en la utilización de los recursos con los que se cuenta, de modo de cumplir con los requerimientos de producción y así capturar la renta objetivo. En este esquema, la misión de los sistemas de despacho es servir de herramienta para acercar los procesos de carguío y transporte al nivel óptimo de utilización de recursos, el cual se denomina como la frontera de producción.

Este trabajo detecta el potencial de mejora que existe en la utilización de los sistemas de despacho de minería a cielo abierto, donde se pone en evidencia la brecha entre la realidad y la frontera de producción, lo que permite evaluar la forma en que se está operando y reformular la gestión si es necesario.

El análisis diagnostica las deficiencias en la utilización de los sistemas de despacho. Además, se desarrolla una metodología que permite cuantificar el costo de oportunidad asociado a las consecuencias de una utilización ineficiente del sistema.

La metodología se aplica en un caso de estudio, en el cual se observa el nivel de costos asociados a la brecha entre las configuraciones reales y el nivel óptimo para algunos turnos. Luego, mediante una simulación se evalúa el costo sobre periodos más extensos con correspondiente impacto en el flujo de caja.

Este trabajo permite concluir que existen oportunidades en la utilización de los sistemas de despacho, junto con la importancia de considerar este costo y de reducirlo reevaluando la forma en que se configura la flota de transporte.

## Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi Madre, por su esfuerzo y cariño, que me ha dado energías para enfrentar con éxito cada desafío. A mis hermanas por su constante preocupación. A mis amigos de la vida, los que me han entregado su cariño y confianza. A mis amigos de la universidad por su compañía en este largo proceso, donde compartimos momentos difíciles y alegrías. A mi profesor guía Christian Moscoso, que a pesar de pasar por momentos difíciles pudo apoyarme y tener paciencia con mi trabajo. A Jigsaw Technologies por permitirme desarrollar esta memoria. Al Departamento de Ingeniería de Minas, por entregarme las herramientas con las que comenzaré una nueva etapa en mi vida. A la Universidad de Chile, que será siempre mi casa... A todos muchas gracias.

# Índice

<b>1</b>	<b>Capítulo Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivos General	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Marco Teórico y Metodológico	5
1.3.1	Motivación	5
1.3.2	Fundamentos Metodológicos	8
1.3.2.1	Mejor Alternativa	9
1.3.3	Procedimiento Metodológico	12
1.3.3.1	Matriz de Origen-Destino	13
1.3.3.2	Matriz Binaria de Permisos	13
1.3.3.3	Matriz de Flujos PL	14
<b>2</b>	<b>Capítulo Antecedentes</b>	<b>20</b>
2.1	Antecedentes Generales	20
2.1.1	Negocio Minero	21
2.1.2	Estrategia en el Negocio Minero	24
2.1.3	Incentivos y Problemas de Agencia	27
2.1.4	Eficiencia y Eficacia	30
2.2	Antecedentes Técnicos	32
2.2.1	Sistemas de Despacho	32
2.2.1.1	Beneficios de un Sistema de Despacho	34
2.2.2	Modelo de Gestión de Mina	35

2.2.3	Indicadores de Gestión.....	36
2.2.4	Inductores de Valor .....	38
2.2.5	Control Macroscópico .....	40
2.3	Modelo de Costos .....	42
2.3.1	Combustible.....	42
2.3.2	Neumáticos.....	44
<b>3</b>	<b>Capítulo de Análisis y Desarrollo.....</b>	<b>45</b>
3.1	Análisis de Causa Efecto en la Utilización de los Sistemas de Despacho .....	45
3.1.1	Personas .....	46
3.1.1.1	Preparación y Conocimiento: .....	47
3.1.2	Procedimientos.....	47
3.1.2.1	Actualización de la Información .....	48
3.1.2.2	Sub-Optimización.....	49
3.1.3	Ambiente .....	49
3.1.3.1	Ambiente Competitivo e Intereses Divergentes. ....	50
3.1.4	Objetivos de la Operación .....	51
3.1.4.1	Utilización Efectiva .....	51
3.1.4.2	Plan de Producción.....	51
3.2	Enfoques de Gerenciamiento de Operaciones.....	52
3.3	Análisis de Herramientas de Sistemas de Despacho.....	55
3.3.1	Herramientas de Restricción de la Programación Lineal.....	55
3.3.1.1	Restricciones referentes a Equipos de Carguío.....	55
3.3.1.2	Restricciones Equipos de Transporte .....	56
3.3.1.3	Definición de Parámetros Principales de la Programación Lineal.....	57
3.3.1.4	Modelos de Mezcla .....	58

3.3.2	Herramientas de Toma de Decisión y Diagnóstico.....	59
3.3.2.1	Pantalla de Ruta .....	59
3.3.2.2	Dashboard .....	59
3.3.2.3	Visor de Combustible.....	59
3.3.2.4	TKPH .....	60
3.4	Cálculo del Costo Oportunidad en Sistemas de Despacho (Caso de Estudio) 61	
3.4.1	Consideraciones Preliminares del Caso de Estudio .....	61
3.4.2	Descripción de la Operación.....	61
3.4.3	Aplicación de la Metodología.....	65
3.4.4	Resultados del Estudio.....	70
3.4.5	Análisis Económico de Resultado .....	74
3.4.5.1	Utilización de Recursos.....	75
3.4.5.2	Simulación de Monte Carlo .....	76
<b>4</b>	<b>Discusión y Conclusiones .....</b>	<b>83</b>
<b>5</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>90</b>
6.1	Algoritmo de Optimización .....	90
6.1.1.1	Función Objetivo: .....	92
6.1.1.2	Restricciones: .....	92
6.2	Herramientas del Sistema.....	95
6.2.1	Pantalla de Rutas .....	95
6.2.2	Dashboard.....	96

## Índice de Tablas

Tabla 1.3.3-1: Matriz Origen-Destino .....	13
Tabla 1.3.3-2: Matriz Binaria de Permisos. ....	14
Tabla 1.3.3-3: Matriz de Flujo PL .....	16
Tabla 1.3.3-4: Matriz de Toneladas PL .....	17
Tabla 1.3.3-5: Matriz de Distancias PL.....	17
Tabla 2.3.1-1: Costo Combustible.....	44
Tabla 2.3.2-1: Ciclo de Vida y Costo Neumáticos .....	44
Tabla 3.1.4-1: Niveles de Enfoques de Gerenciamiento de Operaciones Mineras. ....	52
Tabla 3.4.2-1: Descripción Básica Equipos de Carguío (Caso de Estudio).....	62
Tabla 3.4.2-2: Descripción Básica Equipos de Transporte (Caso de Estudio).....	62
Tabla 3.4.2-3: Materiales y Etiquetas (Caso de Estudio). ....	63
Tabla 3.4.3-1: Parámetros de Control de la Programación Lineal.....	65
Tabla 3.4.3-2: Permisos por Ruta, Origen-Destino Factible. ....	66
Tabla 3.4.3-3: Parámetros Básicos de Configuración de Programación Lineal, por Destino. ....	67
Tabla 3.4.3-4: Parámetros Básicos de Configuración Programación Lineal, por Origen. ....	68
Tabla 3.4.3-5: Distancias por Ruta (Caso de Estudio). ....	68
Tabla 3.4.3-6: Tiempos de Viaje por Ruta en Horas. ....	69
Tabla 3.4.3-7: Flujo Óptimo de Material por Ruta (Caso de Estudio).....	70
Tabla 3.4.4-1: Viajes Propuestos por Programación Lineal. ....	72
Tabla 3.4.4-2: Viajes Realizados en Caso de Estudio.....	72
Tabla 3.4.4-3: Distancia Total por Ruta Propuesta por PL.....	73
Tabla 3.4.4-4: Distancia Realizada (Caso de Estudio).....	73
Tabla 3.4.5-1: Variables y sus Distribuciones a Considerar en la Simulación.....	77
Tabla 3.4.5-2: Resumen de Parámetros Estadísticos de la Simulación (6%). ....	78

Tabla 3.4.5-3: Costo Medio Anual de Ineficiencia y Costo Medio Anual de Oportunidad Asociado a un rango de diferencia porcentual de utilización de recursos, entre la operación y la frontera de producción. ....	80
---	----

## Índice de Gráficos

Gráfico 2.3.1-1: Consumo de Combustible .....	43
Gráfico 3.4.4-1: Distribución de Destinos por Polígono de Extracción, propuesto por Programación Lineal. ....	71
Gráfico 3.4.4-2: Distribución de Destinos por Polígono de Extracción, Realizado (Caso de Estudio) .....	71
Gráfico 3.4.4-3: Distancia Total Recorrida [Km] (Caso Estudio) .....	74
Gráfico 3.4.5-1: Distribución de Costos Asociados a Simulación. ....	78
Gráfico 3.4.5-2: Distribución de Costo de Ineficiencia Anual.....	79

## Índice de Figuras

Figura 1.3.1-1: Superficie de soluciones factibles del problema de máxima producción.	7
Figura 1.3.2-1: Grafico Costo Operativo, Producción.....	12
Figura 1.3.3-1: Diagrama De Entrada y Salida de la Programación Lineal. ....	16
Figura 2.1.4-1: Diagrama Eficacia-Eficiencia .....	31
Figura 2.2.3-1: Diagrama de Distribución de Tiempos ASARCO. ....	36
Figura 2.2.4-1: Diagrama de Correlación de Indicadores.....	39
Figura 2.2.4-2: Diagrama de Escenarios de Disponibilidad de Equipos.....	40
Figura 2.3.2-1: Diagrama Ishikawa Causa-Efecto .....	45
Figura 3.4.5-1: Diagrama de Algoritmo de Optimización While-Olson .....	90

# 1 Capítulo Introducción

## 1.1 Introducción

En minería a cielo abierto los costos de transporte son cerca de un 50% de los costos de mina, además el proceso de transporte ocupa un 70% del tiempo de un turno, mientras que un 30%, es tiempo no productivo. Lo que habla de un gran potencial a optimizar. (1) (2)

En minería a cielo abierto, la tecnología de sistemas de despacho lleva alrededor de 25 años de desarrollo. Con la utilización de estos sistemas se ha obtenido una reducción en los requerimientos de equipos (3) y aumento en la productividad<sup>1</sup>. Pero estos resultados aun muestran un gran potencial de ser optimizados. En la mayoría de los casos se observa una subutilización de los sistemas<sup>2</sup>, esto se aprecia en que no se utiliza todo su potencial optimizante o se restringe de tal modo que se limitan las configuraciones a mejorar.

En los procesos productivos de la minería se tiene una función de producción formada por distintos de factores, ya sea capital, trabajo, recurso minero. En base a esto se puede definir la frontera de producción, como la superficie<sup>3</sup> de configuraciones optimas

---

<sup>1</sup> Para el caso de la productividad, solo en base a observación empírica de resultados a través de comparación con casos previos a la implementación de un sistema.

<sup>2</sup> Esto en basado en la experiencia de especialistas, en base a entrevistas y observación.

<sup>3</sup> Función de producción multidimensional en base a la variación de factores productivos involucrados.

de la función de producción. Existe el rol potencial de los sistemas de despacho, de acercar la gestión a la frontera de producción.

En la realidad, los procesos productivos se ven sujetos a decisiones y situaciones operativas que desvían el óptimo establecido para esas condiciones (o factores productivos).

El potencial de los sistemas de despacho habla de la oportunidad de gestión que es posible realizar dentro de los mismos procesos, ya sea en tiempo real, como también para retroalimentar ciertas decisiones y/o evaluar el costo de ciertas situaciones que desvían la configuración óptima.

Los usos potenciales en cuanto a gestión que puede tener un sistema de despacho bien configurado abre la puerta a oportunidades de mejora tanto para en efectividad, como en eficiencia de los procesos productivos.

Por esta misma razón, parte importante de este trabajo es el desarrollo una metodología que permita apreciar el valor potencial que toman los sistemas de despacho a partir de las diferencias entre configuraciones óptimas y los resultados reales, lo que permite cuantificar el costo oportunidad de destinar los recursos hacia una mejor alternativa. Por otro lado, este trabajo también abordará la utilización que tienen los sistemas de despacho, y cómo es posible explotar su potencial optimizante,

haciendo una síntesis las herramientas principales y las configuraciones propias del sistema.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos General

Los objetivos generales de este trabajo apuntan a:

- Visualizar las características tanto del negocio minero, como de la utilización de sistemas de despacho y administración minera.
- Describir las oportunidades de gestión que entregan los sistemas de despacho.
- Evidenciar el valor de la desviación del óptimo, a partir del contraste entre configuraciones reales y óptimas, con las que se obtiene el costo de oportunidad en la utilización de un sistema de despacho.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer los indicadores de gestión que inciden en la captura y agregación del valor de los sistemas de carguío y transporte para minas a cielo abierto.
- Realizar un análisis de las herramientas utilizadas en los sistemas de despacho.
- Describir la utilización de los sistemas de despacho, focos de gerenciamiento e interés de los entes operadores.

- Evidenciar ciertas decisiones y/o situaciones operativas que desvían la asignación automática de los sistemas de despacho.
- Despliegue de un modelo de programación lineal utilizado por los sistemas de despacho, que permita visualizar la configuración de flujos por ruta afín a su función objetivo.
- Desarrollar una metodología que permita visualizar y cuantificar la diferencia entre lo que apunta el modelo de optimización y los resultados reales que son el reflejo de la intervención operativa,
- Concluir sobre el valor potencial que entrega la correcta utilización de los sistemas de despacho y las oportunidades de gestión a partir de su configuración.

## 1.3 Marco Teórico y Metodológico

### 1.3.1 Motivación

Según Ramírez (4) la cadena productiva en el negocio minero está compuesta por diversos procesos, donde cada uno posee diferentes características que definen su rendimiento y productividad. Además, existen relaciones entre dichos procesos, que generan diversas interacciones y efectos “aguas abajo”.

Es por ello que los niveles de producción de cada proceso se establecen por el nivel óptimo que equilibra la tecnología y la economía, donde se asume el máximo desempeño considerando los ingresos marginales nulos.

Sin embargo, se puede establecer que para un proceso sus posibilidades de producción o trabajo están acotadas y definidas por las variables involucradas en su ejercicio. Asumiendo que la producción de una mina pueda ser descrita por la siguiente fórmula:

$$P = A \cdot K^a \cdot W^b \cdot M^c$$

Donde P puede representar la producción de metal, K se asocia al capital empleado en la producción, W al trabajo y M al recurso minero disponible. La constante A representa la productividad de los factores asociados, mientras que a, b y c son constantes positivas.

De manera más general, la producción P puede ser considerada como una variable componente del vector Y de factores de producción y productos (*inputs* y *outputs*). Las variables  $y_j$  del vector Y que representan productos tienen un valor positivo, mientras que las que se asocian a insumos tienen valores negativos.

Suponiendo además un espacio de n bienes y productos, se puede entonces escribir:

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n$$

Donde P es una de las variables  $y_j$  en particular, que a su vez es función de otras variables del mismo vector, pudiendo expresarse a través de una función implícita.

Considerando una serie de precios  $p_i$  para cada variable  $y_i$ , y un criterio de máximo beneficio, se originan las múltiples combinaciones de factores que permite obtener distintos niveles de producción, las cuales son las soluciones óptimas del problema:

$$\text{Max } P = A \cdot K^a \cdot W^b \cdot M^c$$

sujeto a: K, L, M, P<sub>K</sub>, P<sub>L</sub>, P<sub>M</sub>

ó de manera equivalente y más general:

$$\text{Max } P = y_k$$

sujeto a:  $F(Y) = 0$

$$f_l(y_1, y_2, \dots, y_n, p_1, p_2, \dots, p_n) \leq d_l, l = 1, \dots, m$$

Las soluciones del problema generan la llamada frontera de eficiencia tecnológica, caracterizada por entregar puntos óptimos de producción, en el sentido de generar soluciones factibles que utilizan el total de los recursos de manera eficiente. De manera esquemática, y considerando solo 2 variables para fines gráficos, la frontera de producción tiene la siguiente forma:

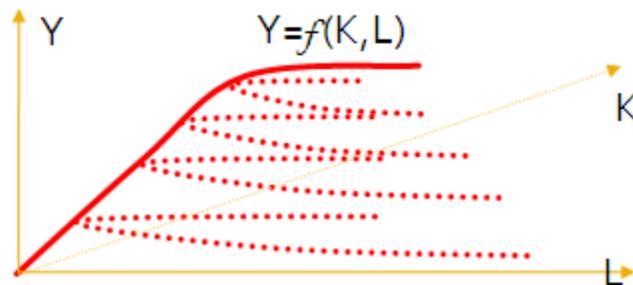


Figura 1.3.1-1: Superficie de soluciones factibles del problema de máxima producción.

Una solución que se encuentre dentro de la región limitada por los ejes y la frontera de soluciones factibles es una solución al problema que sub-utiliza los recursos asignados, puesto que es posible de obtener con menos de los insumos considerados. Un punto fuera de la frontera es no factible, por cuanto necesita de mayor cantidad de insumos para ser posible de alcanzar, o requiere de una tecnología no disponible.

En este sentido, el gerenciamiento de los procesos debe buscar alcanzar un nivel de producción que permita operar en la llamada “frontera de producción” (óptima), de manera tal de obtener la máxima producción factible de alcanzar, con los recursos disponibles.

La motivación principal de este trabajo, es aportar en la tarea de lograr movilizar la gestión de la flota de transporte hacia la frontera de producción.

### 1.3.2 Fundamentos Metodológicos

Es frecuente observar que en las operaciones mineras se producen interrupciones de rutas y desvío por rutas alternativas, ya sea por razones operativas o por interrupciones propias del avance del proyecto. Aún en esos casos, pese a las interrupciones, se cumple con el plan por lo que se logra efectividad operacional, pero se pierde en eficiencia. Esa pérdida de eficiencia es la que se hace interesante evaluar.

La sub-utilización de los sistemas de despacho ofrece situaciones similares, no solo por el hecho de no utilizar la mejor ruta, sino también porque distribución y utilización de los equipos de transporte no es óptima. Lo que finalmente termina considerando y utilizando a los sistemas de despacho como solo simples contadores de ciclos. El no utilizar de manera óptima los recursos implica un costo oportunidad entendido como la diferencia de resultado con respecto a asignar los recursos en la mejor alternativa disponible.

En el presente subcapítulo se plantea la metodología para calcular el costo de oportunidad, y con ello mostrar, de manera concreta, que existe una gran potencial en la utilización de los sistemas de despacho, más allá de una herramienta de control, sino como una herramienta optimizadora del proceso productivo.

### *1.3.2.1 Mejor Alternativa*

La mejor alternativa es la configuración que ofrece mayor efectividad productiva y mayor eficiencia en la utilización de recursos, de un proceso. Cuando se requiere saber cuál es la mejor alternativa de un proceso productivo, se puede analizar según las oportunidades de mejora que estos mismos procesos poseen. Estas oportunidades están asociadas al mejoramiento de indicadores de gestión, con cual se hace necesaria la utilización de herramientas de optimización, para lograr llegar a los rangos deseados de estos indicadores.

Una vez que el plan minero ha desarrollado la mejor alternativa de extracción, se hace necesario para la operación buscar cual es la mejor alternativa de asignación en el transporte y con ello defender la renta obtenida de posibles costos evitables.

Los turnos poseen una configuración de rutas, a partir de las cuales se desarrolla la asignación del despacho de equipos a cada destino. Muchas veces esta configuración de rutas utilizadas, no es la óptima, por distintas circunstancias válidas o no. La presente metodología plantea una manera de lograr cuantificar el no encontrarse con la mejor configuración, pero para ello se hace necesario encontrar la mejor alternativa.

Cuando se requiere saber cuál es la mejor alternativa de configuración que tiene un turno, existen dos posibilidades:

**1.- Cálculo Previo:** Considerando las condiciones iniciales y proyectando resultados a través de supuestos.

**2.- Cálculo Posterior:** Análizando los resultados una vez finalizado el periodo.

Ambas metodologías tienen distinta utilidad, en el caso de la primera, sirve para “Proyectar Resultados”, pero a través de supuestos. En los turnos suceden situaciones que son difíciles de predecir, por lo cual, esta alternativa no sirve para cuantificar cuáles son las oportunidades del turno (pues estas oportunidades van apareciendo según las condiciones). En el caso del Cálculo Posterior, este no sirve para proyectar resultados, pues los resultados ya se obtuvieron, pero sí es útil, para cuantificar cuáles eran las oportunidades del turno, según la configuración de rutas utilizadas y las opciones disponibles y lo que permite aprender hacia el futuro.

El Cálculo Posterior toma en cuenta las condiciones operativas reales del turno, junto con su resultado de operación, por lo cual se puede cuantificar el costo de no haber hecho la asignación óptima.

Además al considerar los valores reales de rendimiento y horas de operación, considera implícitamente la disponibilidad de equipos de carguío por frente, lo cual no distorsiona la optimización dejándola fija e independiente de elementos circunstanciales.

### **¿De qué sirve conocer la mejor configuración no tomada?**

Permite cuantificar el valor de trabajar con la mejor asignación, y con ello verificar el valor las oportunidades que entrega un sistema de despacho utilizando sus potencialidades.

Permite visualizar las prácticas turno a turno, y su nivel de eficiencia, y con ello establecer la retroalimentación para mejorar los procesos.

Además es posible observar la utilización de la disponibilidad por ruta, con lo cual se puede verificar si se han tomado o no, las mejores decisiones en cuanto a la distribución de estos equipos, considerando la prioridad de los frentes de carguío.

### **¿Si la operación es efectiva, cómo puede ser más eficiente?**

Esta metodología permite responder en parte esta pregunta, ya que asumiendo la efectividad en los resultados (cumplimiento del plan), es posible establecer cuáles son las oportunidades de eficiencia en la configuración de la operación. Solo se puede encontrar la operación eficiente, cuando puede visualizar el costo de no serlo.

*“Al final del año importa saber si llegaremos a puerto con la cantidad de cobre comprometida, y a que costo lo logramos... Si logramos llegar con según lo planeado, somos efectivos. Pero si miramos los costos... ¿Somos eficientes?, ¿Estamos siendo competitivos?”*

*René Oliva*

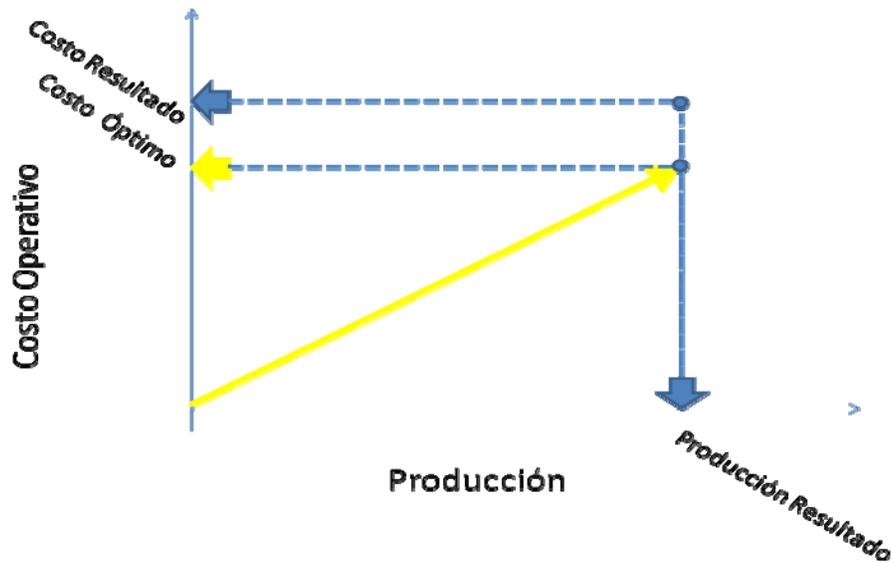


Figura 1.3.2-1: Grafico Costo Operativo, Producción.

En la Figura 1 se muestra el Costo Operativo resultado de cierto grado de producción, junto con el Costo Óptimo que ofrecía la mejor configuración para producir el mismo nivel de tonelaje. Este costo óptimo, pone a la operación en la frontera de producción, donde la utilización de factores productivos maximiza el beneficio. El costo de no encontrarse en la frontera de producción, es el **Costo de Oportunidad** que tiene una operación por no ser lo eficiente, siendo que las condiciones si permiten que lo sea.

### 1.3.3 Procedimiento Metodológico.

El procedimiento de cálculo, considera las restricciones propias de la operación, además de los valores resultado (operativo) del turno real, ya sea tasas de extracción, horas operativas por frente, como también las disponibilidades de ruta de los distintos destinos.

### 1.3.3.1 Matriz de Origen-Destino

Para visualizar las rutas disponibles por cada frente se ha diseñado una matriz Origen-Destino, esta consiste en visualizar por fila cada frente de carguío, que principalmente corresponde a una tronadura o polígono, y ordenar por columna cada destino.

	D1	D2	D3	...	Dn-2	Dn-1	Dn
O1	i1,1	i1,2	i1,3		i1,n-2	i1,n-1	i1,n
O2	i21	i22	i23		i2,n-2	i2,n-1	i2,n
...							
On-1	in-1,1	in-1,2	in-1,3		in-1,n-2	in-1,n-1	in-1,n
On	in,1	in,2	in,3		in,n-2	in,n-1	in,n

Tabla 1.3.3-1: Matriz Origen-Destino

### 1.3.3.2 Matriz Binaria de Permisos

La matriz de permisos se construye como la matriz de Origen-Destino, pero con un contenido de valores binarios (0-1), con lo que se definen los permisos de utilización de destinos por cada origen. Por ejemplo, en el caso de un frente de mineral, sus destinos autorizados son: Chancado y Stock, estos destinos serán asignados con 1; en el caso de los botaderos serán asignados con 0. En la realidad, los distintos materiales están etiquetados con distintas nomenclaturas, con las cuales se define su destino final. En el caso de existir un modelo de mezcla, esta matriz debe considerar las posibilidades de cada origen, según las restricciones del modelo.

BIN	D1	D2	D3	...	Dn-2	Dn-1	Dn
O1	1	1	0	...	0	0	0
O2	0	0	1	...	1	0	0
...	...						
On-1	0	1	0	...	0	1	0
On	1	1	0	...	0	0	0

Tabla 1.3.3-2: Matriz Binaria de Permisos.

### 1.3.3.3 Matriz de Flujos PL

La matriz de flujos, entrega las tasas (ton/hora) de material, desde cada origen a sus destinos, esta matriz debe estar restringida a los permisos de movimiento de material, por lo cual, la matriz resultado de la programación lineal considera esta restricción (para ver en detalle algoritmo, ver Anexos).

Además, la Programación Lineal considera restricciones como:

1. Tasas de Excavación por frente: La suma de los flujos que salen de un frente de carguío, deben ser menor o igual a la tasa de extracción del origen:
2. Tasas de Descarga por Destino: La suma de los flujos que llegan a un destino debe ser menor o igual a las tasas de descarga por cada destino.
3. Continuidad: La suma de los flujos que sale de los puntos de origen, sea igual a la suma de flujos que entra a los puntos de destino.
4. Ajuste a las capacidades de transporte: También conocido como LPMATCHTRUCK, que verifica que la suma de los flujos para cualquier momento es menor o igual a la capacidad de transporte, la cual también considera la disponibilidad media de CAEX.

5. Modelo de Mezcla: En el caso de existir un modelo de mezcla configurado, permite enviar flujos a cada destino según restricciones de ciertos parámetros, como la ley o parámetros metalúrgicos.

Esta programación lineal tiene como función objetivo **minimizar los flujos de transporte por ruta (toneladas por hora)**, cumpliendo con las tasas de extracción, en otras palabras se refiere a minimizar los requerimientos de transporte por cada frente. Con esta función objetivo se apunta a **minimizar los costos de transporte** y cumpliendo con los planes de producción preestablecidos.

Al aplicar la programación lineal, es necesario establecer los parámetros comprometidos por cada restricción. Producto de este proceso de optimización se obtendrá como resultado, una matriz de flujos que satisface la función objetivo.

Esta matriz de flujos, es el Modelo óptimo de flujos por ruta, la que entrega la frontera de producción de cierta operación que según la configuración de sus factores productivos.

De los factores productivos obtenibles de la operación, se obtienen indicadores de producción del turno, como lo es el rendimiento de los frentes de carguío, la disponibilidad de equipos, disponibilidad de puntos de descarga. Estos parámetros son de entrada para el cálculo de la mejor asignación.

Una vez obtenida, la mejor configuración se obtiene un Modelo Óptimo de Flujos por ruta, con una matriz de valores “P<sub>k</sub>” en ton/hora:

Flujo P	D1	D2	D3	...	Dn-2	Dn-1	Dn
O1	P1,1	P1,2	P1,3		P1,n-2	P1,n-1	P1,n
O2	P2,1	P2,2	P2,3		P2,n-2	P2,n-1	P2,n
...							
On-1	Pn-1,1	Pn-1,2	Pn-1,3		Pn-1,n-2	Pn-1,n-1	Pn-1,n
On	Pn,1	Pn,2	Pn,3		Pn,n-2	Pn,n-1	Pn,n

Tabla 1.3.3-3: Matriz de Flujo PL



Figura 1.3.3-1: Diagrama De Entrada y Salida de la Programación Lineal.

Para obtener las toneladas por ruta movidas durante todo el turno, se debe aplicar el factor de las horas operativas reales por cada frente de carguío. Con esto, se obtiene el mismo nivel de producción del turno, pero con una configuración de menor costo en transporte. Se define como Tonelada PL (TPL), las toneladas resultado con la configuración propuesta por la programación lineal.

Tonelada PL del inicio j con destino k = (Flujo del inicio j con destino k)x(Horas operativas del Frente j)

$$TPL_{jk} [\text{ton}] = P_{jk} \left[ \frac{\text{ton}}{\text{hora}} \right] \cdot Hop [\text{hora}]$$

Con lo que se obtiene una matriz de Toneladas PL por ruta:

TPL	D1	D2	D3	...	Dn-2	Dn-1	Dn
O1	TPL 1,1	TPL 1,2	TPL 1,3		TPL 1,n-2	TPL 1,n-1	TPL 1,n
O2	TPL 2,1	TPL 2,2	TPL 2,3		TPL 2,n-2	TPL 2,n-1	TPL 2,n
...							
On-1	TPL n-1,1	TPL n-1,2	TPL n-1,3		TPL n-1,n-2	TPL n-1,n-1	TPL n-1,n
On	TPL n,1	TPL n,2	TPL n,3		TPL n,n-2	TPL n,n-1	TPL n,n

Tabla 1.3.3-4: Matriz de Toneladas PL

Paralelo a esto se cuenta con una matriz de las distancias por ruta disponible ( $DR_{jk}$ ).

Esta matriz es útil tanto para la programación lineal como para obtener la distancia total de toda la flota de transporte de un turno.

Una vez obtenidos los tonelajes se divide por el factor de carga de la flota de transporte usado por cada equipo de carguío ( $FC_j$ ), con lo que se obtiene, la cantidad de vueltas por turno.

Con lo anterior se obtiene una matriz de distancias (en metros) totales por ruta:

$$DPL_{jk} = \frac{TPL_{jk}}{FC_j} \cdot DR_{jk}$$

DPL	D1	D2	D3	...	Dn-2	Dn-1	Dn
O1	DPL 1,1	DPL 1,2	DPL 1,3		DPL 1,n-2	DPL 1,n-1	DPL 1,n
O2	DPL 2,1	DPL 2,2	DPL 2,3		DPL 2,n-2	DPL 2,n-1	DPL 2,n
...							
On-1	DPL n-1,1	DPL n-1,2	DPL n-1,3		DPL n-1,n-2	DPL n-1,n-1	DPL n-1,n
On	DPL n,1	DPL n,2	DPL n,3		DPL n,n-2	DPL n,n-1	DPL n,n

Tabla 1.3.3-5: Matriz de Distancias PL

Una vez obtenida la matriz DPL, es posible utilizar el modelo simplificado de costos de insumos de transporte, el cual está basado en valores de dólares por metro. De esto

se obtiene el costo total del turno. Al comparar la diferencia con la configuración real., se obtiene el costo de ineficiencia.

Este costo es asociado a los insumos básicos de la flota de transporte, ya sea combustible o neumáticos con lo que se define  $C_{insumosT}$  [USD<sup>4</sup>/m].

Se define los Costos Insumos de Transporte Optimizados como  $C_{opt}$  [USD].

$$C_{opt} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n DPL_{j,k} [m] \cdot C_{insumosT} \left[ \frac{USD}{m} \right]$$

Se define además los Costos de Insumos de Transporte Real como  $C_{real}$  [USD].

$$C_{real} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n DReal_{j,k} [m] \cdot C_{insumosT} \left[ \frac{USD}{m} \right]$$

Es claro observar que las distancias obtenidas en el turno real son superiores a las obtenidas por la configuración propuesta a través de programación lineal ( $DReal_{j,k} \geq DPL_{j,k}$ ) de esto es posible obtener el costo de ineficiencia, ya que proviene de una utilización mayor a la necesaria, bajo el mismo nivel productivo.

Este costo finalmente se deriva de la diferencia entre el Costo de Insumos de Transporte Real y el Optimizado.

$$\text{Costo Ineficiencia de Configuración [USD]} = C_{real} - C_{opt}$$

---

<sup>4</sup> USD: Símbolo Dólar Estadounidense Estándar Internacional ISO4217 ([http://es.wikipedia.org/wiki/ISO\\_4217](http://es.wikipedia.org/wiki/ISO_4217))

Este costo de ineficiencia asociado a recursos que fueron utilizados, no siendo esta la mejor configuración, por lo tanto una utilización alternativa de estos recursos significa un costo oportunidad que la operación está asumiendo de manera implícita. Este costo evidencia la oportunidad que existe en cuanto a la utilización de los sistemas de despacho y administración minera. Esta oportunidad es la que se quiere mostrar en este trabajo, partiendo por un análisis del negocio minero, diagnóstico de la utilización de los sistemas y una evaluación de los resultados de esta.

## 2 Capítulo Antecedentes

### 2.1 Antecedentes Generales

Los antecedentes previos al desarrollo de este trabajo se basan en entregar un marco bajo el cual se establecerá el análisis, así como también el contexto bajo el cual se consideran los conceptos y variables a mencionar, ya sea elementos propios del negocio, como también indicadores bajo los cuales se desarrollan las conclusiones de este trabajo.

Como primer aporte, es importante considerar el contexto bajo el cual se mueve el negocio minero, y como este, tiene particularidades que lo hacen distinto al resto de negocios, ya sea tanto a la hora de plantear una estrategia corporativa, como a la hora de llevar a cabo esta estrategia en la operación diaria. Además se hablará de los intereses existentes entre los distintos agentes ejecutores, y como muchas veces estos intereses dificultan el alineamiento de las decisiones para con la estrategia. También se definirán conceptos clave como lo son la eficiencia y eficacia.

Además se hace trascendental conocer de manera general los sistemas de despacho y el rol que estos cumplen en la operación, como también los enfoques que estos deben tener.

Finalmente se caracterizará un modelo simplificado de costos, a partir del cual se podrán estimar los costos a considerar en los análisis de este trabajo.

### 2.1.1 Negocio Minero

El negocio minero tiene propiedades únicas que lo diferencian del resto, incluso dentro del mismo conjunto de negocios de recursos naturales, tiene particularidades propias.

Robin Adams (5) caracterizó los tipos de negocio en tres categorías:

- **Negocios conducidos por los recursos:** El factor crítico es el acceso a los recursos naturales.
- **Negocios conducidos por los procesos:** El factor crítico es la eficiencia en cómo un *commodity* es convertido en otro.
- **Negocios conducidos por los mercados:** El factor crítico es la habilidad de diferenciar un producto o servicio de sus competidores y que éstos reflejen un valor a los consumidores.

La mayoría de las industrias caen en la categoría de negocios manejados por el mercado. Por lo que la mayor parte de la teoría en administración de negocios ha sido desarrollada con este enfoque.

El factor que diferencia las industrias basadas en el manejo de los recursos, son los propios recursos naturales y su ocurrencia, ya sea como recursos minerales o energéticos los cuales no pueden ser reproducidos.

Uno de los elementos que caracteriza a este tipo de negocio es la invariabilidad de los *commodities* al ser vendidos a un precio común en todo el mundo.

Por lo cual, las compañías que tienen acceso a los **recursos más atractivos**, deberían consistentemente ser las de **mayores rentas**.

Esto entrega un elemento de valor que no está relacionado a la inversión en trabajo y capital, sino más bien a lo que es llamado "**renta económica**", que es la remuneración derivada del control y propiedad de un recurso natural.

El desafío de la gestión en la industria minera debe estar enfocado a la **adquisición y la defensa** de la renta económica.

Existe la tendencia de pensar que la gestión se debe basar en la **reducción de costos**, lo cual habla de una industria unidimensional, lo cual es simple desde el punto de vista de una estrategia de liderazgo.

Pero las cosas no suelen darse de esa manera. Una compañía cuya estrategia está limitada a reducir costos, perderá un gran número de oportunidades. Adicionalmente, al buscar aprovechar economías de escala, esta estrategia conduce a la realización de grandes inversiones, disminuyendo así la remuneración del factor capital. (6)

Las compañías más exitosas no necesariamente son aquellas que tienen reputación de bajar costos.

Las compañías que pertenecen al grupo de negocios manejado por los recursos, necesitan precisar sus ventajas comparativas en función de asegurar y defender sus rentas económicas, y necesitan ser concientes acerca del **marco de decisiones** que

tienen en función de la defensa y el sostenimiento de sus fuentes de ventaja competitiva.

Esto significa reconocer que la reflexión estratégica debe ir más allá que la simple reducción de costos. Se deben tomar las decisiones que consideren los factores productivos y que tengan como norte, el alineamiento de la defensa y la adquisición de la renta económica.

Asumiendo entonces que la planificación minera tiene como directrices la planificación estratégica, se tiene que los resultados del diseño minero deben perseguir la captura de la renta. Entonces una vez que se obtiene el recurso, se debe defender la renta tanto de los intereses externos como de las ineficiencias propias.

En otras palabras, el negocio minero se asume controlado por los recursos, pero una vez que el recurso minero es obtenido producto de una planificación que entrega la renta objetivo, es en el cortísimo plazo donde se debe defender de las ineficiencias, pues es en esta etapa donde la diferencias de costos para obtener mismo recurso minero, dependen de que tan bien logrado sea el proceso. La defensa en de la renta en esta instancia se debe hacer a través de procesos, en los cuales debe seguir viva la estrategia y se debe hacer sustentable a través de procesos eficientes.

## 2.1.2 Estrategia en el Negocio Minero

Es clave entonces, entender cómo se estructura la estrategia de una empresa, pero para ello es necesario comprender el concepto estrategia competitiva, el cual se puede definir de diversas formas, entre ellas se pueden mencionar las siguientes (6):

Estrategia Competitiva es...:

...la determinación de los objetivos de largo plazo básicos de una empresa, y la adopción de las cursos de acción y de asignación de los recursos necesarios para llevar a cabo esos objetivos. -Alfred Chandler.

...el patrón de objetivos, metas o propuestas, las principales políticas y planes para alcanzar estos objetivos, iniciados de tal manera, que define qué tipo de negocio en los que la empresa se desenvuelve, (o debiere), y en el tipo de empresa que es, o debería ser.-Kenneth Andrews.

...lo que determina el marco de actividades que posee una empresa, y proporciona directrices para la coordinación de esas actividades a fin de que la empresa pueda hacer frente a la influencia y el entorno cambiante. Estrategia articula las preferencias medioambientales y el tipo de organización en la que se esfuerza en convertir. - Hiroyuki Itami.

Las definiciones anteriores hablan de “largo plazo” y “políticas principales”, por lo que sugiere que son las grandes decisiones de una empresa, las que finalmente determinan su éxito o fracaso.

Entonces nace la pregunta de qué es lo que debe hacer una empresa para desplegar su estrategia, y de ello surgen los siguientes requerimientos:

- Tener objetivos de largo plazo claros.
- Explotar los potenciales de rentabilidad que existen en el tiempo.
- Adaptarse a las circunstancias.
- Tomar decisiones en términos de consistencia a los principios de la economía de mercado y de las acciones estratégicas.

Los principios deben ser la base de un análisis sistemático de la estrategia.

Para el caso de una empresa minera se hace interesante comprender cuál es el marco en que una estrategia se desarrolla y este principalmente se resume en:

Límites de la empresa: ¿Qué es lo que la empresa debe hacer, cuán grande debe ser, y qué negocios debe desarrollar?

Mercado y análisis competitivo: ¿Cuál es la naturaleza del mercado en el cual la empresa compite, y cuál es su interacción con las otras firmas del mismo mercado?

Posición y Dinamismo: ¿Cuál es la posición en que la firma compete, cuál es su ventaja competitiva y cómo se ajusta en el tiempo?

Organización Interna: ¿Cómo una firma debería organizar su estructura y sistemas internos?

¿Cómo se alinea la estrategia de una firma en la toma de decisiones de la operación diaria?

La operación se estructura como un proceso (productivo), el cual se debe desenvolver dentro del marco de la estrategia, y lo que debe sostener estos límites son políticas de efectividad y eficiencia en la gestión.

¿Cómo se estructuran las decisiones de corto (cortísimo) plazo?

Las decisiones de cortísimo plazo nacen de la coyuntura, pero para tomar decisiones que tengan un alineamiento con la estrategia es necesario tener una visión macroscópica no solo de la estructura de la operación, sino también del negocio.

¿Cuál es una política de incentivos correctos, que estén alineados a las estrategias corporativas?

Para lograr que los agentes operadores tomen decisiones que vayan en pos de la estrategia de la empresa, se hace necesario una política de incentivos que logre atar

los intereses externos al negocio, y dirigirlos hacia a la función objetivo (correcta y coherente con la estrategia).

Los des-alineamientos se producen por una divergencia de intereses, incentivos mal alineados, y tácticas poco efectivas.

### 2.1.3 Incentivos y Problemas de Agencia

El des-alineamiento en gran parte se debe a los problemas de agencia, los cuales se entienden de la siguiente manera (7):

Un agente actúa a nombre de otro sobre quien recaen las consecuencias de la acción emprendida, y los intereses de cada uno no tienen por qué coincidir. En tal caso, ¿es posible implementar contratos (óptimos) con los incentivos suficientes como para resolver un eventual conflicto de intereses? Este tipo de situaciones se conoce como el **problema principal-agente**. El principal es quién ofrece el contrato, y el agente es quién debe realizar determinadas tareas que permitan conseguir los objetivos planteados por el principal.

El contrato debe proporcionar los incentivos suficientes como para que el agente maximice la utilidad del principal y no la suya propia. Tema que es muy sensible en la minería, pues en algunos casos, los sindicatos funcionan defendiendo los intereses de los agentes (trabajadores) de forma muy efectiva.

Es importante entonces, considerar las condiciones que se deben cumplir en el contrato:

Se debe ofrecer lo suficiente para asegurarse de que el agente acepte el contrato. Es decir satisfacer la restricción de **racionalidad individual**.

La oferta debe ser suficiente para garantizar que el agente elige la acción particular que el principal desea. Esta restricción se conoce como **compatibilidad de incentivos**.

Es fácil comparar el beneficio esperado del principal si éste ofrece un contrato que lleve al agente a realizar un esfuerzo bajo con el que se acaba de obtener y comprobar que será inferior, de forma que el principal deseará que el agente realice un gran esfuerzo.

La diferencia entre los beneficios del principal cuando los esfuerzos son observables y cuando no lo son, es denominada como **costes de agencia**.

El tipo de contrato considerado asigna todo el riesgo al agente, quien puede terminar teniendo un salario elevado si los ingresos de la empresa son elevados, pero un salario bajo si los ingresos son reducidos. Si el agente fuera adverso al riesgo, se encontraría en una mejor situación con una menor variación de su posible remuneración que depende de los posibles estados de la naturaleza. En esta situación, consecuentemente, el agente podría preferir otro mecanismo de rentas como el reparto de ingresos. (7)

Con respecto al caso del negocio minero y el alineamiento de la planificación estratégica. Es el principal, en este caso el inversionista o la gerencia corporativa, el que despliega los lineamientos en función de la **captura de la renta económica o fines estratégicos**.

El alineamiento de estos objetivos corporativos muchas veces no se ve tan claro en la toma de decisiones de operación, y esto se deriva en parte, por el **problema de agencia** que se produce al no existir (o existir de manera contraproducente) incentivos que alineen la **captura eficiente de la renta económica** con las decisiones prácticas y cotidianas<sup>5</sup>.

Un caso de incentivo perverso es el bono al cumplimiento de los planes de producción. Esto debido a que dicho incentivo apunta a una meta que no necesariamente involucra **eficiencia** en la utilización de los recursos y esfuerzos (pero sí a la **eficacia**). Aun así, este incentivo se hace necesario para lograr las metas de producción. Otro es el caso de la búsqueda de utilización efectiva, en donde se puede incluso descuidar la eficiencia, con la utilización de los recursos.

Por este motivo se hace necesario contar con una estructura de incentivos acorde a los planes estratégicos y aplicables a la coyuntura operativa. Este trabajo analizará las metodologías de gestión y se enlistarán herramientas que entregan los sistemas de

---

<sup>5</sup> Se plantea como hipótesis en base a la experiencia.

despacho útiles en la tarea de llevar a la operación hacia la frontera de producción moviéndose dentro del marco de la estrategia.

#### 2.1.4 Eficiencia y Eficacia

*“No basta con hacer las cosas correctamente, hay que hacer las cosas correctas”*

*Peter Drucker*

En este trabajo eficiencia y eficacia (o Efectividad) son conceptos que se utilizan a menudo, es importante entonces comprender en profundidad a que se refiere cada uno.

La eficiencia y eficacia son elementos básicos para cumplir los objetivos propuestos en las organizaciones y su adecuada dosificación es condición fundamental para un liderazgo exitoso (8).

Las acciones que realiza una empresa deben ser medibles por sus objetivos, cuando los objetivos se alcanzan se es eficaz o efectivo, en cambio el concepto de eficiencia se refiere a la utilización de los recursos para lograr estos objetivos.

En muchos casos, la reflexión estratégica con la cual una empresa traza sus planes solo apunta a lograr objetivos, lo que puede sonar *maquiavélico* (en el sentido de que el fin justifica los medios), y lo es. Pero para asegurar su competitividad a largo plazo es necesario hacer sustentable estos planes, y esto se logra movilizandó la gestión hacia la frontera de producción (eficiencia).



Figura 2.1.4-1: Diagrama Eficacia-Eficiencia

El diagrama anterior, sectoriza los niveles de eficiencia y eficacia, se debe partir por la premisa que para que una organización funcione debe existir al menos, un mínimo nivel de eficacia y eficiencia en sus procedimientos.

El peor escenario es cuando los procedimientos no logran sus objetivos, ni tampoco se administran los recursos, por lo que se alcanzan bajos niveles de eficiencia y efectividad. Lo cual genera una actitud vegetativa, lo que indica que la organización no tiene posibilidades de ser competitiva.

También es difícil pensar que una organización puede mantener sus procesos con altos niveles de eficiencia y efectividad, pero **siempre es preferible** que sus procesos se encuentren en los cuadrantes superiores, pues la eficacia finalmente es la que será juzgada, donde se evalúa el cumplimiento de los objetivos.

## 2.2 Antecedentes Técnicos

### 2.2.1 Sistemas de Despacho

Los sistemas de despacho son herramientas de software, las cuales permiten resolver el problema de cuál es el “mejor” destino al cual debe ser asignado un camión. Esto se resuelve desplegando la mejor configuración propuesta por la programación lineal (ver Fundamentos Metodológicos)

Dentro de la definición de “mejor” destino existen varios objetivos que pueden ser perseguidos por dicha asignación, ya sea que está enfocado hacia la maximización de la producción, o utilización efectiva de equipos, o reducción de tiempos de espera, etc.

Alarie y Gamache (8) plantean que los sistemas de transporte se caracterizan por lo siguiente:

- Sistema de transporte son considerados como sistemas cerrados, donde el despacho es continuo en los turnos (de 8 a 12 Hr)
- Las distancias de viaje son considerablemente menores a los tiempos de turno (10-25 min), y la frecuencia de demanda en los puntos de acarreo es alta (3-5min).
- Por ello cuando los eventos son conocidos es posible establecer pronósticos de cómo funcionarán y cómo se pueden llevar a cabo de mejor manera los procesos.

Definen además estrategias de despacho que son las utilizadas por los distintos sistemas:

- **1 Camión para n Palas:** El camión es despachado hacia la pala que ofrece un mayor potencial de maximizar el beneficio. El factor clave en este caso es la **utilización**.
- **m Camiones para 1 Pala:** En este caso se requiere satisfacer las necesidades de carguío para una base relativamente fija de equipos de transporte, por lo que el factor clave son **los flujos de transporte**.
- **m Camiones para n Palas:** Para este caso se utilizan métodos combinatoriales de optimización, y entrega de decisiones de despacho de acuerdo a una **visión global**, que toma en cuenta los diferentes aspectos del problema, este modelo es de mayor complejidad, y requiere una programación no lineal que en algunos casos entrega soluciones evaluables en cuanto a su factibilidad.

Alarie y Gamache, además plantean que un **sistema de despacho ideal** debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Deben estar basados en multi-etapas de decisión.
- Algoritmo que tenga en cuenta todas las restricciones de la faena, y tenga en cuenta la factibilidad de sus soluciones.
- Un mayor control y redefinición de flota según objetivos en tiempo real.

### *2.2.1.1 Beneficios de un Sistema de Despacho*

La empresa *Modular Mining Systems* (9), plantea los beneficios de contar con un sistema de despacho se pueden traducir en beneficios tangibles e intangibles:

- Beneficios Tangibles:
  - Incrementar la productividad de la flota de carguío y transporte dada.
  - Reducir el requerimiento de tamaño de flota asociado a este aumento de productividad.
  - Minimizar el sobre manejo de ciertos equipos.
  - Mezclar distintas restricciones simultáneamente
  - Asegurar la velocidad de alimentación a planta.
  
- Beneficios Intangibles:
  - Pronosticar el rendimiento comparativo entre distintos tipos de equipos de carguío y transporte.
  - Generación de reportes en línea.

La operación de carguío y transporte plantea distintos objetivos que deben ser perseguidos en la toma de decisiones. Estos objetivos son denominados concurrentes (9).

La concurrencia es la simultaneidad de múltiples tareas iterativas. Estas tareas pueden un conjunto ser procesos o hilos de ejecución creados en un mismo origen (programa).

Se refiere entonces a los objetivos paralelos que se persiguen en la operación de carguío y transporte, como son por ejemplo, cumplimiento de tonelaje, cantidad de mineral a planta, reducir la pérdida operacional, reducir costos, maximizar beneficio, etc.

Todos los objetivos planteados anteriormente se sitúan en una sola operación que es la realizada por el equipo de carguío y su flota de transporte asociada.

### 2.2.2 Modelo de Gestión de Mina

El gerenciamiento de la operación se debe fundamentar en un modelo de captura y generación de renta económica, donde se consideren además los lineamientos estratégicos de la compañía junto con el respeto a la seguridad de las personas, los equipos e instalaciones, el medio ambiente y la calidad.

Las estrategias estándares para la generación de valor por la vía de la eficiencia operacional son:

- Mejorar la eficiencia en la utilización de los activos.
- Política de contención de costos.
- Invertir aprovechando la economía de escala, en función de reducir los costos.
- Externalizar procesos con el fin de eliminar activos.

### 2.2.3 Indicadores de Gestión

La principal utilización de los sistemas de despacho está dada por la asignación de equipos en la operación de carguío y transporte, esta asignación está definida bajo ciertos parámetros e indicadores los cuales se pre-establecen dependiendo de los requerimientos de la faena.

Existen diversas definiciones en el sentido de la distribución de tiempos, y de cómo estos indican el comportamiento de los equipos tanto para la flota de carguío como de transporte.



Figura 2.2.3-1: Diagrama de Distribución de Tiempos ASARCO.

Si bien existe una definición formal de los tiempos de desempeño de un equipo, es común que existan errores en la medición de estos parámetros, debido a que existe un modelo de estimación de dichos datos que produce diferencias entre los datos medidos y los reales.

Basado en ello, los principales indicadores de gestión de en carguío y transporte son los siguientes:

**Disponibilidad:** Porcentaje de tiempo en el que el equipo se encuentra en condiciones de operar.

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Tiempo Efectivo} + \text{Pérdidas Operacionales} + \text{Demoras} + \text{Reservas}}{\text{Tiempo Nominal}}$$

**Utilización Efectiva:** Representa el uso efectivo del activo en función del tiempo disponible.

$$\text{Utilización Efectiva (\%)} = \frac{\text{Tiempo Efectivo}}{\text{Tiempo Disponible}}$$

**Porcentaje Pérdidas Operacionales:** Indica el porcentaje del tiempo disponible del activo en que este se presenta en colas o esperando.

$$\text{Porcentaje Pérdidas Operacionales (\%)} = \frac{\text{Pérdidas Operacionales}}{\text{Tiempo Disponible}}$$

**Porcentaje de Demoras:** Indica el porcentaje del tiempo disponible del activo en que se encuentra en demora programada y no programada.

$$\text{Porcentaje de Demoras (\%)} = \frac{\text{Demoras Programadas} + \text{Demoras No Programadas}}{\text{Tiempo Disponible}}$$

**Porcentaje de Reserva:** Indica el porcentaje del tiempo disponible del activo, en el que se encuentra habilitado para trabajar pero no está siendo utilizado por operación.

$$\text{Porcentaje de Reserva (\%)} = \frac{\text{Tiempo de Reserva}}{\text{Tiempo Disponible}}$$

#### 2.2.4 Inductores de Valor

Un inductor de valor es simplemente cualquier variable que afecta el valor de una empresa. Para que sea útil, los inductores necesitan ser organizados de manera que se pueda identificar cuáles tienen mayor impacto sobre el valor, para de esta manera asignar la responsabilidad de su desempeño a individuos que puedan colaborar para que la organización pueda alcanzar sus objetivos.

Se puede utilizar como herramienta en la toma de decisiones en tiempo real. Los indicadores de tiempos del sistema de despacho y la variable estadística coeficiente de correlación, como indica la figura siguiente. (10)

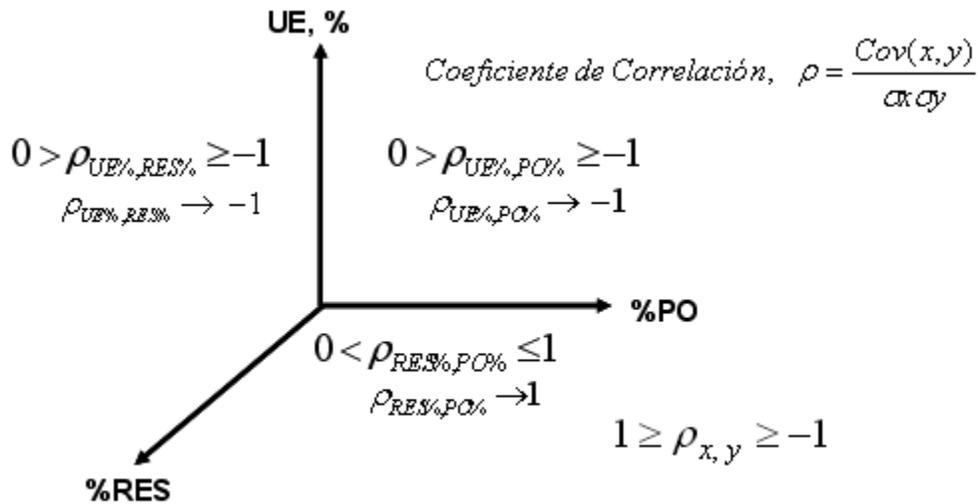


Figura 2.2.4-1: Diagrama de Correlación de Indicadores

Al contar con un esquema como el de la figura anterior, el objetivo es maximizar la Utilización Efectiva (UE%) y minimizar tanto el porcentaje de Pérdidas Operacionales (%PO) como el de Reservas (%RES), de los tiempos de los equipos, esto último a condición del dimensionamiento de la flota.

Si se grafica la disponibilidad de los equipos de carguío (Dcf%) con la disponibilidad de los equipos de transporte (Dcaex%), es posible definir cuadrantes, donde la correlación de los indicadores UE%, %PO y %RES, tienen distintos comportamientos. El escenario ideal de trabajo es en los cuadrantes II y IV, donde en todo instante el objetivo es maximizar la UE% y minimizar tanto el %PO como %RES. Si la relación

entre las disponibilidades, se encuentra en los valores de diseño, el cumplimiento del plan se da en condición de eficiencia operacional.

Si nos encontramos en los cuadrantes I ó III, el cumplimiento del plan se puede dar pero en condiciones de ineficiencia operacional, lo que obliga a modificar los escenarios operacionales, para volver a un escenario conocido donde debemos asegurar una correlación negativa entre la UE% y %PO.

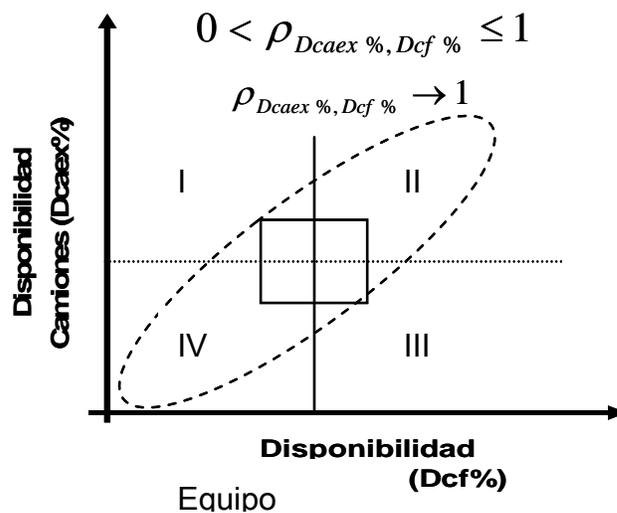


Figura 2.2.4-2: Diagrama de Escenarios de Disponibilidad de Equipos.

### 2.2.5 Control Macroscópico

Para generar un plan de desarrollo en la gestión de la operación de los turnos en carguío y transporte, se hace necesario implementar un plan de visualización de las características de la operación y cómo se realiza la optimización de los procesos y la asignación de equipos.

Según lo que plantean (2) Wang y otros, para la optimización de un sistema, es necesario unificarlo y mirarlo desde una perspectiva global. Con ello plantea que una visión macroscópica permite tener un **control de todas las situaciones, y de todo el proceso.**

Cuando existe la metodología de realizar una optimización solo a principio de turno (**método manual**), no se logra el máximo beneficio, pues **no se optimizan los flujos de interacción** entre los puntos de descarga y los puntos de carguío.

Cuando existe un control **y readecuación en tiempo real** del proceso, los flujos de transporte son corregidos, corrigiendo las **desviaciones implícitas que ya lleva la operación** (ejemplo: tomar en cuenta pérdidas operacionales).

Los flujos de entrada a las zonas de descarga suelen ser superiores a los flujos salientes de los puntos de carguío.

Por ello los puntos de descarga deben ser considerados clave en el despacho de los camiones, controlar estos flujos se hace trascendental.

Por lo que (2) Wang y otros, proponen la implementación de principios que permitan reducir las pérdidas operacionales:

**El primer principio** habla de saturación de los puntos de descarga, lo que invita a reducir la flota de transporte para regularizar el flujo, lo que significa un ajuste en los tiempos de espera para transporte.

El **segundo principio** habla de la saturación en los puntos de carguío, lo que invita a incrementar la cantidad de flujo de transporte.

## 2.3 Modelo de Costos

El modelo de costos utilizado en este trabajo se basa solo considerando los insumos básicos de transporte; combustibles y neumáticos por ser estos los insumos de mayor relevancia, pero cabe destacar que al considerar solo estos elementos en el cálculo del costo oportunidad, se subestima su valor, debido a que no se consideran los costos asociados a mantención o insumos menores los cuales se pueden asociar a esta mayor utilización.

Para esto la información se ha obtenido en base al consumo estándar de un camión de extracción (CAEX) modelo Caterpillar 930. Además se ha considerado como base la información disponible en el MME *Surface Mining Equipment 2007* (13) y Información proveniente de CODELCO Norte y Minera Esperanza.

### 2.3.1 Combustible

El consumo de combustible por lo general se estima a partir del consumo por hora, pero para este caso se hace necesaria una estimación por distancia por lo que se ha hecho la transformación en base a los datos operativos resultados de una hora operativa estándar.

El consumo de un CAEX (+340 ton) es alrededor de 240 litros por hora operativa, considerando que en una hora operativa según los ciclos promedio recorren entre 10 a 16 km, esto sin diferenciar el consumo detenido o en movimiento. Por esto la estimación es compleja de depurar pero se mueve dentro de ciertos rangos.

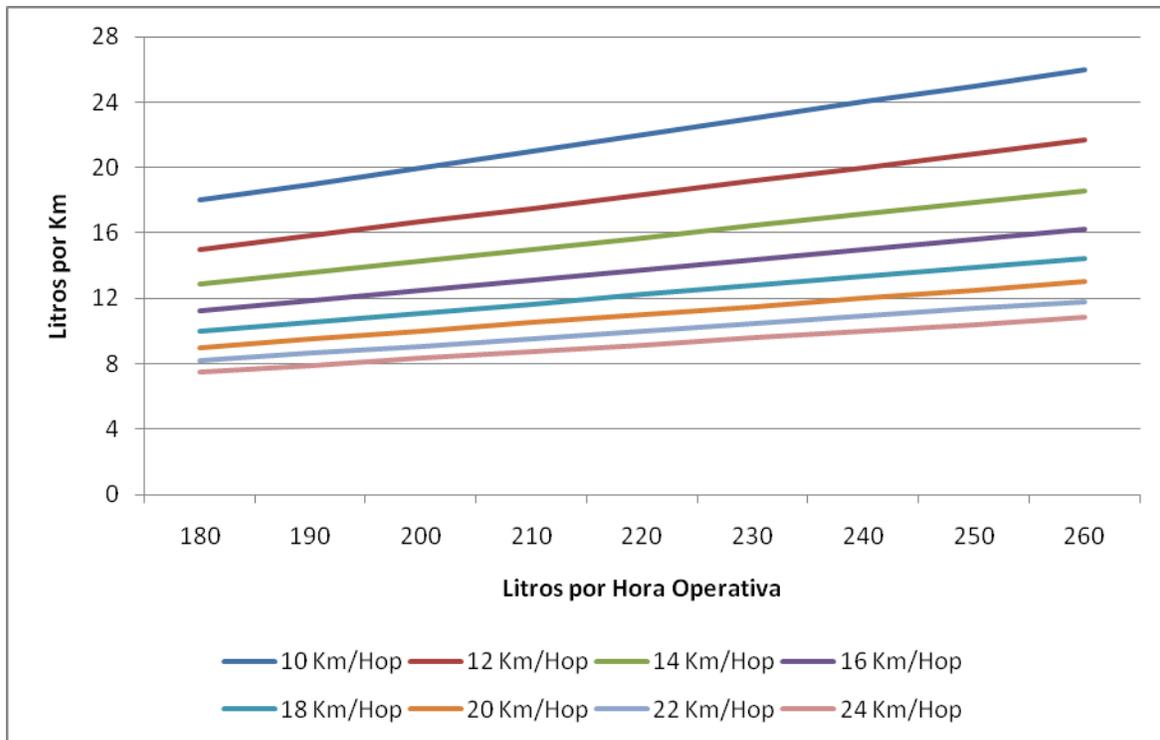


Gráfico 2.3.1-1: Consumo de Combustible

De este grafico se puede observar el rango de consumo de Petróleo Diesel, modelo a partir del cual se realizará el cálculo.

Para este caso se considera el costo de Petróleo Diesel:

Diesel	2,489	USD/Gallon
Diesel	0,66	USD/Litro

Tabla 2.3.1-1: Costo Combustible

### 2.3.2 Neumáticos

Para el caso de los neumáticos, el consumo se estima en horas operativas, en el caso estándar cada neumático de CAEX (sobre 340ton) se estima una duración de 4200 horas, por lo tanto asumiendo un promedio de 14 Km/Hora, el ciclo de vida en distancia estimado resulta:

Ciclo de Vida Neumático	4200	Horas Operativas
Ciclo de Vida Neumático	58.800	Km
Costo Unitario (Neumático CAEX +340ton) (13)	77.929	USD

Tabla 2.3.2-1: Ciclo de Vida y Costo Neumáticos

Con estas consideraciones se hará la estimación de los costos asociados a una utilización sub eficiente del sistema, desarrollo que se mostrará en el capítulo siguiente.

### 3 Capítulo de Análisis y Desarrollo

#### 3.1 Análisis de Causa Efecto en la Utilización de los Sistemas de Despacho

A continuación, se desarrolla un análisis con respecto a la utilización que tienen los sistemas de despacho, y los diversos enfoques con los que se enfrenta la gestión de operaciones.

Se ha notado<sup>6</sup> un cierto grado de subutilización de las herramientas disponibles en los sistemas de despacho, esto es producto de varios factores que inciden.

A continuación se realizará un análisis de Causa Efecto (Ishikawa) con lo cual se describen los distintos elementos que inciden en la sub-utilización de los sistemas de despacho.

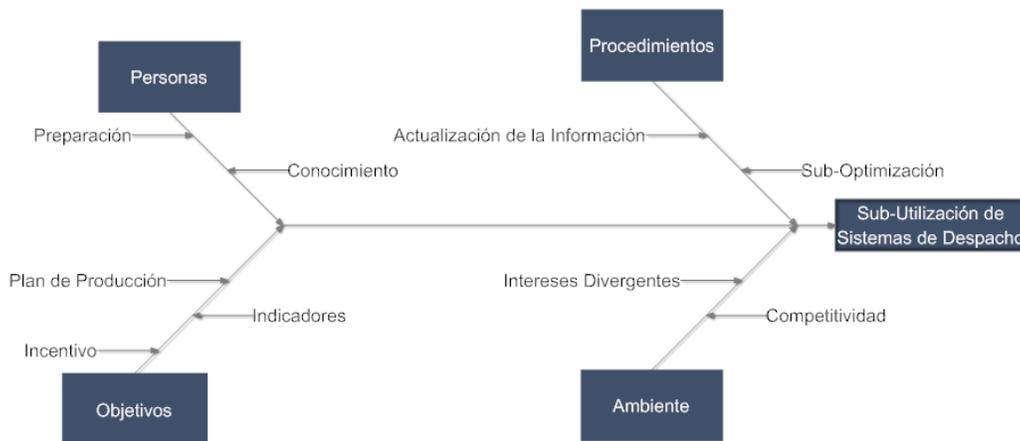


Figura 2.3.2-1: Diagrama Ishikawa Causa-Efecto

<sup>6</sup> Según experiencia en distintas operaciones y dialogo con especialistas en sistemas de despacho.

Se dividido en cuatro principales elementos causales, de los cuales se derivan una serie de sub-causas, lo que apunta finalmente a tener como resultado deficiencias en la utilización de los sistemas de despacho.

1. Personas
2. Procedimientos
3. Ambiente
4. Objetivos

Para profundizar en el análisis de cada causa se debe hacer una revisión de las sub-causas asociadas.

### 3.1.1 Personas

Un sistema de control de producción (como lo es un sistema de despacho) requiere el involucramiento de las personas tanto en la motivación interna de cada individuo como en la voluntad de buscar la mejor gestión para con la operación y el negocio.

En la operación minera es donde existe la mayor inversión en activos de una empresa minera, por lo que es clave que en la administración de estos recursos existan personas con la suficiente preparación y conocimiento en gestión minera.

Es importante entonces que el control de un sistema de despacho sea llevado a cabo por alguien con las capacidades de liderazgo, preparación y conocimiento necesario. Esto en muchos de los casos no suele darse así. El operador de un sistema de

despacho debe conjugar distintas cualidades, que le deben ayudar a tomar las mejores decisiones, tanto basadas en la experiencia, como en el conocimiento que se tenga de las directrices del negocio.

#### *3.1.1.1 Preparación y Conocimiento:*

Un operador de despacho debe ser un profesional, característica que en muchos casos (a nivel local) no se suele dar, y esto debido a la subestimación de la importancia que tiene este rol dentro de la operación. Debe ser un profesional preparado en la administración de los recursos, con el liderazgo necesario, y la capacidad de gestionar con las conductas de las personas. Es importante que sea capaz de establecer cuáles son las prioridades que debe considerar la operación (con visión de negocio), alimente de información y configure al sistema de manera de sacar el mejor provecho para el negocio.

#### **3.1.2 Procedimientos**

En cuanto a la manera en como las personas operan con un sistema de despacho, uno puede encontrar distintos tipos de conducta, y éstas muchas veces están influenciadas por los objetivos por los cuales se tiene un sistema de despacho. En el caso particular de los procedimientos, es posible apreciar que estos sistemas son muy sensibles a la actualización de la información por lo cual requieren una constante supervisión y retroalimentación, esto es porque la operación minera, es dinámica en el sentido de

que suceden eventos o situaciones que hacen variar las condiciones de la mina o la accesibilidad a los recursos de extracción.

### *3.1.2.1 Actualización de la Información*

La actualización de la información que alimenta a un sistema de despacho es un procedimiento clave, y esto es porque el algoritmo optimizante de asignaciones trabaja en función de estos parámetros, entre los cuales se puede mencionar:

- Ubicación de Equipos de Carguío
- Polígonos y Tronada de Extracción
- Ubicación de Zonas de Descarga
- Cambio de Estado de Equipos
- Gráfica de Rutas
- Restricciones de la Programación Lineal
  - Requerimientos de Alimentación para diversas zonas de Descarga (Chancado, Stock)
  - Prioridades en los equipos
  - Tazas de extracción deseadas por equipo de carguío
  - Modelo de Mezcla
  - Etc.

Si estos parámetros no son actualizados, el sistema funcionará en condiciones sub-óptimas, llegando en algunos casos a solo operar como un contador de ciclos.

### *3.1.2.2 Sub-Optimización*

La sub-optimización se observa además cuando la configuración de equipos de transporte se restringe de manera que la optimización del sistema se ve muy limitada, siendo imposible utilizar todo el potencial. En esos casos muchas veces se suele forzar la utilización de equipos, saliéndose del rango propuesto por la programación lineal, produciéndose pérdidas operacionales, que podrían evitarse flexibilizando la configuración.

### **3.1.3 Ambiente**

El ambiente bajo el cual se desenvuelve la operación minera, muchas veces es sometido a varios elementos que desvían los objetivos de la utilización de los sistemas de administración minera. Estos elementos principalmente se asocian al ambiente competitivo, en los que prima el alcance de resultados inmediatos sin una evaluación a priori del impacto que tienen estos, en el negocio. La existencia además, de una serie de incentivos des-alineados conducen a intereses divergentes. Esto sumado al factor humano y emocional bajo el cual se mueven ciertas decisiones tanto de operadores de equipo como de los mismos supervisores, hace complejo el escenario.

### *3.1.3.1 Ambiente Competitivo e Intereses Divergentes.*

Un ambiente competitivo es sano para el desarrollo de la operación, pero las métricas con las cuales se debe competir deben ser acordes a las realidades que se desean evaluar, la competencia se debería basar en comparación de resultados, y cómo estos resultados, con las métricas correctas, impactan positivamente al valor del negocio.

Asociado a esto existe una presión laboral continua por obtener los resultados que satisfacen los intereses de los mandos medios. Esta presión impacta a quien supervisa o toma las decisiones operativas en lo cotidiano, como también a los operadores en terreno. Este impacto se refleja en algunos casos en conductas de rebeldía que toman algunos operadores para con el sistema, (de lo cual se puede atribuir además a la idiosincrasia cultural o bien a el bajo nivel de control que se tiene de dichas conductas).

Un ejemplo de esto, es cuando un operador decide descargar en una zona donde no ha sido asignado, con el objetivo de tener ciclos más cortos (a veces sin discriminar el tipo de material) y satisfacer el logro de niveles de producción por tiempo, asociados a un incentivo o bonificación. El problema ahí no es la conducta del operador, sino la alineación del incentivo y los intereses involucrados (Problema de Agencia). Cuando estas conductas se hacen cotidianas, se termina haciendo vista gorda por el nivel de mando inmediato debido a que el incentivo es compartido.

### 3.1.4 Objetivos de la Operación

Los objetivos que se persiguen en la operación minera, muchas veces no logran ser tan claros en cuanto a su trasfondo y valor que entregan al negocio.

#### 3.1.4.1 Utilización Efectiva

El algoritmo optimizante de un sistema de despacho (administración de mina) tiene como función objetivo la minimización de las tasas de transporte por ruta (toneladas/hora, por ruta), teniendo como restricción el cumplimiento de las tasas de extracción para cada frente de carguío. Esto en otras palabras es cumplir con el rendimiento de los equipos de carguío, utilizando la menor cantidad de equipos de transporte.

Cuando en una operación se persigue maximizar la utilización efectiva de los equipos de transporte, lo que se está haciendo es forzar un objetivo contrario al algoritmo optimizante. Producto de esto se observarán configuraciones de asignación no-óptimas (en cuanto a la utilización de recursos). Lo que finalmente derivará en una sub-utilización del sistema y una utilización no eficiente de los recursos.

#### 3.1.4.2 Plan de Producción

En la operación se busca cumplir un plan de producción anual en el cual se asume una óptima captura de la renta, a partir de un diseño minero que debe contemplar los requerimientos promedio de cada entidad productiva. Este plan considera una serie de

indicadores que al nivel de coyuntura pierden sentido al no existir las condiciones base a las cuales fueron calculados como óptimos. La operación minera es un proceso dinámico, por lo tanto debe contar con indicadores con una métrica que sea absoluta comparable por cada turno y con ello, poder evaluar cual es la distancia que se tiene del nivel óptimo de producción (frontera de producción).

### 3.2 Enfoques de Gerenciamiento de Operaciones

Existen distintos enfoques bajo los cuales se rige la dirección de operaciones con lo que finalmente se deriva la utilización de los sistemas de administración de una mina y los objetivos que rigen esta utilización. Una manera de diferenciar los grados de enfoque de objetivos que tiene la administración de una operación minera, podría representarse en la siguiente escala:

Grado	Aspectos De Enfoque	
1º Grado	Nivel de Producción	Seguridad y Medio Ambiente
2º Grado	Indicadores (KPI)	Calidad
3º Grado	Control de Costos	Sustentabilidad del Negocio
4º Grado	Integración de Procesos del Negocio	Planificación Agregada

Tabla 3.1.4-1: Niveles de Enfoques de Gerenciamiento de Operaciones Mineras.

El 1º Grado es nivel más básico, donde se encuentra el cumplimiento del plan de producción, lo que implica satisfacer la alimentación a planta y el movimiento hacia stock y botaderos con la cantidad de toneladas propuestas ya sea a un turno o periodo de tiempo determinado, cumpliendo a la vez con las medidas de seguridad y cuidado de las condiciones medioambientales.

El 2º Grado involucra el cumplimiento de indicadores preestablecidos por el presupuesto, y además poner un énfasis en la calidad (leyes de componentes) del material movilizado y que se encuentre dentro de los modelos de mezcla establecidos para cada destino.

El 3º Grado Involucra una visión de control de costos locales, se toman decisiones considerando cumplir con las consideraciones de los grados anteriores, pero buscando eficiencia en la utilización de los recursos. En el caso de los procesos mineros, la línea que diferencia las decisiones operativas de las tácticas es sutil, y está dada solo por el nivel de reversibilidad de las consecuencias de estas decisiones. En la operación del día a día es posible tomar decisiones que comprometen el plan turno a turno y con ello la sustentabilidad del negocio.

En el 4º Grado existe un nivel de compromiso estratégico de integración para con las demás entidades productivas del negocio (por ejemplo Mine-to-Mill<sup>7</sup>). Además de existir

---

<sup>7</sup> Operación integrada Mina-Planta:

Referencia: [http://.minas.upm.es/%2Fcatadra-anefa%2FJuan\\_Ignacio\\_modulo3%2Fconcepto\\_mine\\_to\\_mill.pdf](http://.minas.upm.es/%2Fcatadra-anefa%2FJuan_Ignacio_modulo3%2Fconcepto_mine_to_mill.pdf)

un control macro, existe una planificación agregada (11) la que es útil para determinar las actividades y recursos a utilizar a un mediano plazo.

En la mayoría de los casos, solo se busca lograr los dos primeros grados, por lo cual se privilegia los niveles de eficacia, siendo éstos lo que finalmente son evaluados en el desempeño de quien dirige la operación.

Si bien lo descrito sucede en a nivel de gerenciamiento, los sistemas de administración minera tienen una misión mucho más precisa en cuanto a estos grados de enfoque administrativo propuestos, y su nivel de aporte puede llegar hasta los primeros tres grados. Pero para que ello suceda, es necesario tener conciencia de la importancia que tiene una correcta utilización del sistema y un conocimiento de los principales módulos de optimización, lo que permite dirigir la herramienta hacia los focos objetivos deseados.

### 3.3 Análisis de Herramientas de Sistemas de Despacho.

Para lograr finalmente abordar el aporte que hacen los sistemas de administración minera, en particular los sistemas de despacho, es necesario analizar cuáles son sus herramientas, y como estas son utilizadas.

Estos módulos se pueden diferenciar entre **Herramientas de Restricción de la Programación Lineal**, y **Herramientas de Toma de Decisión y Diagnóstico**.

#### 3.3.1 Herramientas de Restricción de la Programación Lineal

##### *3.3.1.1 Restricciones referentes a Equipos de Carguío*

El modulo de restricciones de equipos de carguío cuenta con diversas maneras de priorizar el uso de cada pala o cargador. Para esto existen tres niveles bajo los cuales se puede restringir la tasa de excavación.

1. **Cobertura:** Es un indicador cuyo valor porcentual se refiere al grado de cumplimiento que se tiene con respecto a la capacidad de carguío de una pala o cargador frontal, en un frente de extracción determinado. Cuando se tiene un 100% de cobertura, se refiere a que se opera a la completa capacidad del equipo de carguío, de modo que si se llega a niveles inferiores al 100%, se obtienen pérdidas operacionales en carguío. Al contrario, cuando se obtienen niveles superiores al 100% de cobertura, esto indica que se está saturando la capacidad de carguío, lo que finalmente significa tener capacidad de transporte ociosa (pérdidas operacionales en transporte). Cuando se presenta un nivel de cobertura con respecto a una región, que sea conjunto de varios frentes de

carguío, se refiere al promedio de cobertura para cada frente. Se ha observado una confusión al respecto por parte de operadores de despacho, los cuales indican como cobertura deseada fracciones del porcentaje total (100%), de modo que la suma de estos porcentajes alcance el total. Esta situación habla del grado de desconocimiento del real significado de este indicador.

2. **Prioridad:** La prioridad es el grado deseado de preferencia que tiene una pala o cargador con respecto a otro. Cuando se trabaja con prioridades, es necesario comprender que los rendimientos de cada equipo de carguío son diferentes, por lo que al priorizar uno sobre otro, se debe tener conciencia de que el sistema tratará de asegurar la tasa de extracción del equipo que tenga mayor prioridad, lo cual en algunos casos puede ir en desmedro de la capacidad de carguío de equipos que tienen mayores tasas de extracción.
3. **Tasa de Extracción Deseada:** Cuando se requiere lograr ciertos niveles de extracción para equipos de carguío en frentes de extracción específicos, esta es la herramienta que entrega la mayor capacidad de alineación con respecto a los planes de producción para cada frente. De todas maneras, es necesario tener conocimiento de las tasas de extracción real que posee el equipo, de modo de no sobre-estimar sus capacidades, lo que podría llegar a ocasionar pérdidas operacionales en transporte.

### *3.3.1.2 Restricciones Equipos de Transporte*

La configuración de las restricciones en equipos de transporte se encuentra ligada a establecer destinos factibles o preferidos para cada flota.

1. **Por Región:** El restringir un camión de extracción a una región determinada, entrega al sistema de despacho la posibilidad de realizar optimizaciones locales, de modo que se limita el rango de interacción entre distintos tipos de flota de

transporte. Esta restricción es común de utilizar cuando existen flotas de transporte con distintas capacidades en factor de carga, o bien compatibilidades específicas con determinados equipos de carguío. Muchas veces la suma de óptimos locales, no es el óptimo global.

2. **Por Pala:** Esta restricción es mucho más coercitiva que la anterior, debido a que anula la capacidad de optimización del sistema, lo cual desactiva la asignación dinámica de los camiones de extracción hacia los equipos de carguío que tengan mayores requerimientos.
3. **Por Descarga:** Cuando se fija la descarga o se descartan ciertas descargas, se pasa por alto el modelo de mezclas (en el caso de existir), por lo que se anula la optimización por parámetros de ley contenida<sup>8</sup>. Por lo tanto hace que el sistema se restrinja solo por la etiqueta de cada material, y no por la ley media estimada, contenida en el material transportado.

### *3.3.1.3 Definición de Parámetros Principales de la Programación Lineal*

Los parámetros principales de la programación lineal muchas veces son desconocidos por quien opera un sistema de despacho. Esto es debido a que son establecidos al comienzo de la implementación del sistema y son valores por defecto, por lo que no suelen ir variando turno a turno.

1. **Tonelaje de Control:** Es la cantidad (en toneladas) de material a partir de la cual se realizará la optimización. Este es el valor con el cual se persigue el óptimo en la utilización de los recursos. Por defecto se establece el tonelaje del factor de carga medio de todas las flotas de transporte, para así lograr optimizaciones a

---

<sup>8</sup> Se refiere a los parámetros de ley u otros (por ejemplo: Ley Cu, % CaCO<sub>3</sub>, %As, Wi, P<sub>bond</sub>, etc.) mínimos, máximos y medio, establecidos para cada destino, como parte de un modelo de mezcla.

nivel de un solo camión. Cuando uno establece tonelajes de control que son fracciones no menores del total esperado por la producción, se logra que la programación lineal realice optimización en un escenario mayor, que considera una interacción mayor entre la flota de transporte.

2. **Frecuencia o Tiempo de Control:** Es el periodo o intervalo de tiempo usado para estimar la capacidad de carguío y transporte, con la cual se revisarán las comparaciones establecidas dentro de las restricciones de la Programación Lineal. En otras palabras, es el periodo de tiempo bajo el cual se está optimizando.

#### *3.3.1.4 Modelos de Mezcla*

Los modelos de mezcla son una restricción más dentro de la programación lineal, y sirven como una herramienta útil en el momento de establecer el mejor destino para un material transportado. Ésto siempre y cuando este material contenga la información necesaria para establecer una relación entre el modelo ingresado al sistema, y las leyes estimadas (ya sea por geología o planificación). Es decir, rangos de ley, y/o parámetros de procesamiento metalúrgico.

La función de este modelo es acotar de forma superior e inferior los rangos de entrada a diversas zonas de descarga, de ciertos parámetros característicos de un material, por ejemplo, ley de elementos objetivos (Cu, Au, As, Mo, etc.). Por lo tanto si el material en cuestión se encuentra por fuera de los rangos establecidos para un destino, es posible establecer las mezclas correspondientes de material de modo que en el periodo y

tiempo de control establecido, se pueda cumplir esta restricción(Para más detalle, ver Algoritmo de Optimización en Anexos).

Se ha evidenciado una escasa utilización de esta herramienta, debido a que se han establecido destinos fijos para cada etiqueta de los materiales, lo que impide la mezcla continua de materiales.

### 3.3.2 Herramientas de Toma de Decisión y Diagnóstico

#### 3.3.2.1 *Pantalla de Ruta*

La pantalla de ruta es la visualización lineal de las rutas entre cada equipo de carguío y sus destinos asociados, según el material y tasas de extracción logradas. Por lo que es muy útil para visualizar el comportamiento de la mina (ver Anexos).

#### 3.3.2.2 *Dashboard*

El *Dashboard* o tablero, es una herramienta de visualización de indicadores en tiempo real, lo que permite tomar decisiones coherentes con la situación actual de la mina. Con esta herramienta con la cual es posible coordinar la operación de modo de redirigir los indicadores hacia los objetivos del plan (ver Anexos).

#### 3.3.2.3 *Visor de Combustible*

El sistema de administración minera también incluye un visualización de los niveles de combustible según lo que puedan indicar los signos vitales del equipo o bien a través

de un algoritmo que se ajuste al nivel de consumo de cada equipo y considere la cantidad de litros ingresada al sistema.

#### *3.3.2.4 TKPH*

La velocidad es uno de los factores que afecta la vida útil de los neumáticos. Para permitir la evaluación del desempeño de los neumáticos en función de temperatura, carga media y velocidad media, fue creado el índice TKPH (Tonelada km por hora). El TKPH es el resultado del producto VM (velocidad media) x CM (carga media), en base diaria, donde el neumático puede operar sin desarrollar temperaturas internas excesivas. (12)

El sistema de administración minera (o despacho) posee las herramientas para dar aviso de niveles de riesgo, según los niveles de TKPH establecidos para cada neumático. Algo que sigue pendiente dentro del mercado de sistemas de despacho, es incluir esta variable dentro de las restricciones de asignación.

## 3.4 Cálculo del Costo Oportunidad en Sistemas de Despacho (Caso de Estudio)

### 3.4.1 Consideraciones Preliminares del Caso de Estudio

El caso de estudio a considerar en este análisis considera los datos de una faena real, pertenecientes a un periodo y condiciones estándares de operación.

Se evaluaron las condiciones en que se utilizaba el sistema, y se procedió a utilizar la metodología antes presentada, con el objetivo de cuantificar el nivel de oportunidad de mejora que tienen las configuraciones tomadas y con ello calcular el costo oportunidad de no encontrarse en la frontera de producción.

Como consideraciones preliminares mencionan los parámetros básicos con los cuales se aplicó la metodología y cómo éstos dan cuenta de las dimensiones de la operación.

### 3.4.2 Descripción de la Operación

El caso de estudio se ha realizado en base a la información del sistema de despacho proveniente de un yacimiento minero de cobre y oro, ubicado en las cercanías del poblado de Sierra Gorda, Región de Antofagasta, Chile.

Esta empresa minera se encuentra en su periodo de Prestripping, pero aún así existe diferenciación entre mineral y estéril. Por esto mismo, los destinos para cada tipo de material se encuentran predefinidos.

El régimen de turnos es de 12 horas, la configuración del turno de día consiste en la utilización de 2 de las tres palas disponibles, y durante el turno de noche se utiliza la tercera con material distinto al turno día, por lo cual es posible muestrear días completos como periodos de análisis.

Con respecto a los equipos de la flota de carguío y transporte, se describen a continuación.

Equipo de Carguío:

Modelo	P&H 4100 XPC
Capacidad de Carga Nominal	104.3 ton métricas
Capacidad Balde	77 yd <sup>3</sup>
Cantidad	3

Tabla 3.4.2-1: Descripción Básica Equipos de Carguío (Caso de Estudio).

Equipos de Transporte:

Modelo	Caterpillar 797F
Factor de Carga	387 ton métricas

Tabla 3.4.2-2: Descripción Básica Equipos de Transporte (Caso de Estudio).

En cuanto a la clasificación de material, existe una categorización según la litología, por lo que definen etiquetas según cada tipo.

Material	Etiqueta
Lastre	EST
Lastre con Oxido	LOX
Oxido de Baja Ley	OXB
Oxido	OXI
Oxido de Alta Ley	OXA

Tabla 3.4.2-3: Materiales y Etiquetas (Caso de Estudio).

En esta etapa del proyecto todo el mineral extraído es depositado en pilas de stock, en el caso del estéril se deposita en diversos botaderos.

A modo de tener un control de las rutas disponibles para cada turno se ha verificado la disponibilidad de cada destino. De este modo será posible establecer cuál es la gama de rutas a considerar para cada destino (definiendo destino como punto de descarga para una ruta establecida desde un frente de carguío). Las distancias y tiempos de cada ruta se han estimado según los últimos valores promedio obtenidos por el último ciclo en recorrerla.

Cabe considerar que para que los resultados tengan validez es necesario tener las rutas creadas, con sus distancias correspondientes y pendientes asociadas.

Además se ha considerado la disponibilidad de transporte según el promedio para cada periodo muestreado, de modo de considerar la oportunidad de utilización solo en base la cantidad de equipos con los que se cuenta.

Hay que destacar que este análisis se hace en base a los resultados de rendimientos operativos reales, por lo cual considera la disponibilidad real de equipos de carguío y transporte. Al no trabajar bajo rendimientos presupuestos se elimina un grado de libertad, con lo que se puede evaluar según las condiciones (reales) del frente, lo que hace este análisis independiente de los resultados productivos, de modo que más bien entrega un diagnóstico de la utilización de los recursos.

Este análisis está enfocado a cuantificar la diferencia en costo de no utilizar la mejor alternativa disponible. Se define entonces que la mejor alternativa disponible es tal, que cumple con el nivel de producción planificado, y con la distribución de material deseada, pero con la menor utilización de recursos de por medio. Además considera las rutas disponibles a cada destino alternativo por lo que si una ruta es alternativa, es porque era posible y factible su utilización, es decir se asume que la disponibilidad de los destinos declarada al sistema, es la real. Muchas veces las causas asociadas al no uso de estas configuraciones están determinadas por situaciones puntuales o decisiones operativas que son complejas de registrar. Por tal motivo, este estudio solo evaluará el costo con respecto a la sobre-utilización de recursos, según la configuración establecida.

### 3.4.3 Aplicación de la Metodología

Para aplicar la metodología se han considerado las condiciones reales como parámetros de entrada al modelo de modo de obtener de manera fiel resultados coherentes con la operación.

Dentro de esto se ha definido los parámetros básicos de control de la programación lineal. Según valores estándar utilizados en operaciones reales se ha establecido los siguientes valores:

<b>Masa de Control</b>	25.000 toneladas
<b>Frecuencia de Control</b>	3 por hora

Tabla 3.4.3-1: Parámetros de Control de la Programación Lineal.

La Masa de Control es la masa a partir de la cual se realizará la optimización, el Tiempo de Control es el periodo en el cual se fijaran también los resultados, todo esto basado en un movimiento total de 200 mil toneladas día.

Junto con esto se ha establecido la capacidad de transporte actual, con la que se establece el ajuste con las capacidades de carguío. Este ajuste es necesario para precisar que el requerimiento de transporte no debe ser superior a sus capacidades, como es lo establecido dentro de las restricciones del modelo.

Así utilizando la disponibilidad de equipos ( $NC_{disp}$ , número) y el factor de carga asociado a cada equipo (FC, toneladas), se ha obtenido la capacidad de transporte ( $Tac$ , en toneladas) con la que se ajusta el modelo.

$$Tac = NC_{disp} \cdot FC_i$$

En el caso de la faena estudiada, no se aplicó modelo de mezclas debido a que no se encontraba configurado y solo se consideraba la distinción entre destinos según la etiqueta establecida para cada material (en cada polígono).

El primer paso es establecer una tabla de autorización con la cual se fijan los posibles destinos de un polígono, según las restricciones propias de cada material. Como en el cuadro de ejemplo a continuación, donde se define de manera binaria los permisos, es decir donde “1” es acceso permitido, y “0” denegado según el origen y el destino que se evaluara en el periodo.

Tabla de Permisos	ROM	ST_OXIDO ROM	BOT_CENTRAL	BOT_RAJO	BOT_CAMINO
2264/12/A/OXI	1	1	0	0	0
2264/14/B/OXI	1	1	0	0	0
2264/14/C/OXB	1	0	0	1	0
2264/17/D/OXB	1	0	0	1	0
2264/18/A/LOX	1	0	1	1	0
2312/01/EST	0	0	0	0	1

Tabla 3.4.3-2: Permisos por Ruta, Origen-Destino Factible.

Además se definen los parámetros propios de cada polígono. En el caso de existir un modelo de mezcla, se debe incorporar los valores de los parámetros a medir también se incorporan los niveles de prioridad utilizados por el modelo. Además se consideran los rendimientos reales obtenidos en promedio, durante el periodo de muestra. En el caso que se quiera establecer un análisis de estimación de producción, se puede

modificar estos parámetros (estableciendo valores supuestos), pero en este caso se trata solo de un análisis de utilización por lo que se presupone un mismo nivel de producción.

Tabla de Ingreso de Parámetros por Polígono	Prioridad Zi <sup>9</sup> [h]	Rendimiento Op Rk [t/h]
2264/12/A/OXI	200	3.200
2264/14/B/OXI	200	7.000
2264/14/C/OXB	200	7.000
2264/17/D/OXB	200	4.834
2264/18/A/LOX	200	6.000
2312/01/EST	200	1.322

Tabla 3.4.3-3: Parámetros Básicos de Configuración de Programación Lineal, por Destino.

Con respecto a los destinos se establecen los parámetros de entrada, como lo son la prioridad, los tiempos de descarga promedio para cada uno, y las tasas límite de entrada de material (en el caso de que no exista un límite se pondrá un valor muy alto, ejemplo 1E+36).

---

<sup>9</sup> La prioridad se expresa en horas, y se elige un rango alto de modo de darle peso en la ecuación, (ver anexo). Para este caso se ha elegido la misma prioridad para cada frente.

Tabla de Ingreso de Parametros por Destino	Prioridad Zj	Tiempo Medio Descarga DTj	Tasa de Descarga Limite PDj
ROM	20	0,006	1E+36
ST_OXIDO ROM	20	0,001	1E+36
BOT_CENTRAL	20	0,011	1E+36
BOT_RAJO	20	0,001	4.000
BOT_CAMINO	20	0,002	5.000

Tabla 3.4.3-4: Parámetros Básicos de Configuración Programación Lineal, por Origen.

Luego se ingresan las distancias entre cada ruta válida o posible. A partir de ello se genera una matriz de distancias, con los valores correspondientes. En el caso de las rutas no utilizadas se fijará un valor muy alto, de modo que la programación lineal no opte por ellas.

Tabla de Distancias por Ruta [m]	ROM	ST_OXIDO ROM	BOT_CENTRAL	BOT_RAJO	BOT_CAMINO
2264/12/A/OXI	4.932	3.805	1E+58	1E+58	1E+58
2264/14/B/OXI	5.063	4.015	1E+58	3.933	1E+58
2264/14/C/OXB	4.934	4.015	1E+58	3.933	1E+58
2264/17/D/OXB	5.064	4.071	1E+58	4.034	1E+58
2264/18/A/LOX	5.090	1E+58	3699	1.850	1E+58
2312/01/EST	1E+58	1E+58	1E+58	1E+58	160

Tabla 3.4.3-5: Distancias por Ruta (Caso de Estudio).

Además se incluyen los tiempos de viaje promedio de los tramos utilizados, donde también se consideran valores altos para los tramos no considerados dentro de la optimización. Estos valores incluyen implícitamente consideraciones propias de las características de cada ruta, donde en algunos casos se puede observar rutas de

mayores distancias pero con tiempos de viaje menor o similar esto debido a las pendientes o formas de cada una. También hay que destacar que estos valores son datos promedio, según tiempos reales logrados por equipos en el mismo periodo. En el caso de no existir experiencia previa sobre un tramo, se establece una velocidad media por tramo de lo cual se obtiene los tiempos base que en una programación dinámica son retroalimentados continuamente.

<b>Tablas de Tiempos de Viaje [h]</b>	ROM	ST_OXIDO ROM	BOT_CENTRAL	BOT_RAJO	BOT_CAMINO
2264/12/A/OXI	0,34	0,26	1E+58	1E+58	1E+58
2264/14/B/OXI	0,35	0,27	1E+58	0,27	1E+58
2264/14/C/OXB	0,34	0,27	1E+58	0,27	1E+58
2264/17/D/OXB	0,35	0,28	1E+58	0,28	1E+58
2264/18/A/LOX	0,35	1E+58	0,25	0,13	1E+58
2312/01/EST	1E+58	1E+58	1E+58	1E+58	0,01

**Tabla 3.4.3-6: Tiempos de Viaje por Ruta en Horas.**

Además junto con anterior, se obtienen los rendimientos y horas operativas promedio para cada origen.

Una vez que se han ingresado los parámetros base, se establecen las restricciones descritas en la metodología y en base a esto se obtiene la matriz de flujos por ruta como resultado.

Flujo Material por Ruta [t/Hr Operativa]	ROM	ST_OXIDO ROM	BOT_CENTRAL	BOT_RAJO	BOT_CAMINO	Flujo por Polígono Pi
2264/12/A/OXI	0	3.200	0	0	0	3.200
2264/14/B/OXI	0	7.000	0	0	0	7.000
2264/14/C/OXB	7.000	0	0	0	0	7.000
2264/17/D/OXB	4.834	0	0	0	0	4.834
2264/18/A/LOX	0	0	2.000	4.000	0	6.000
2312/01/EST	0	0	0	0	1.322	1.322
<b>Flujo de Entrada por Destino Pj</b>	11.834	10.200	2.000	4.000	1.322	
<b>Flujo Total [t/h]</b>	29.356				Total Pi	29.356

Tabla 3.4.3-7: Flujo Óptimo de Material por Ruta (Caso de Estudio).

Con esta matriz se procede a calcular las toneladas correspondientes a cada ruta a partir de los rendimientos y horas operativas correspondientes.

Con la matriz de toneladas es posible establecer los viajes realizados por cada ruta (según el factor de carga) y con ello obtener los metros totales recorridos por la flota según las distancias asociadas a cada ruta. Así es posible establecer la comparación con respecto a la configuración real utilizada, y la óptima propuesta.

#### 3.4.4 Resultados del Estudio

Luego de aplicada la metodología, corresponde un análisis de los resultados, para lo cual se mostrará un caso (real), a modo de ejemplo.

Es posible evidenciar diferencias entre la configuración real (utilizada) y la propuesta (óptima en cuanto a la utilización de recursos). A continuación se muestran los gráficos

de distribución de material de un caso ejemplo, estos gráficos permiten visualizar el destino del material proveniente de cada polígono.

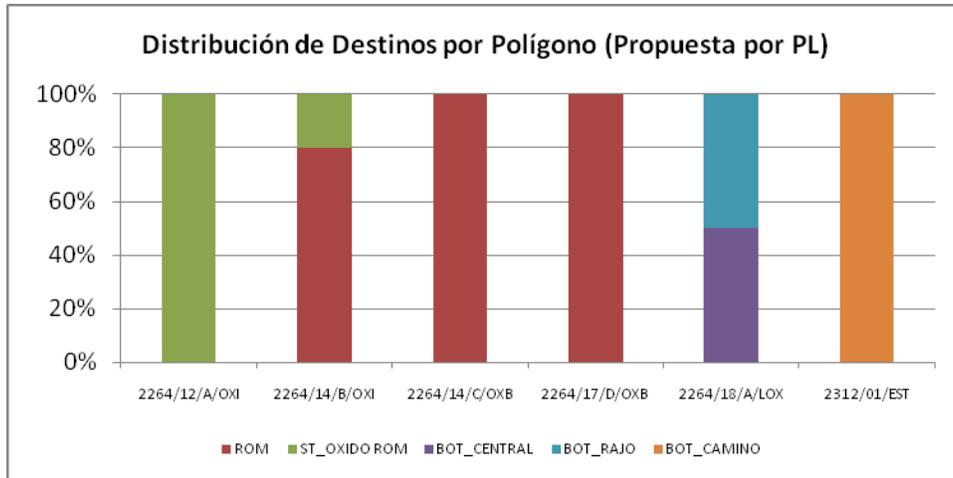


Gráfico 3.4.4-1: Distribución de Destinos por Polígono de Extracción, propuesto por Programación Lineal.

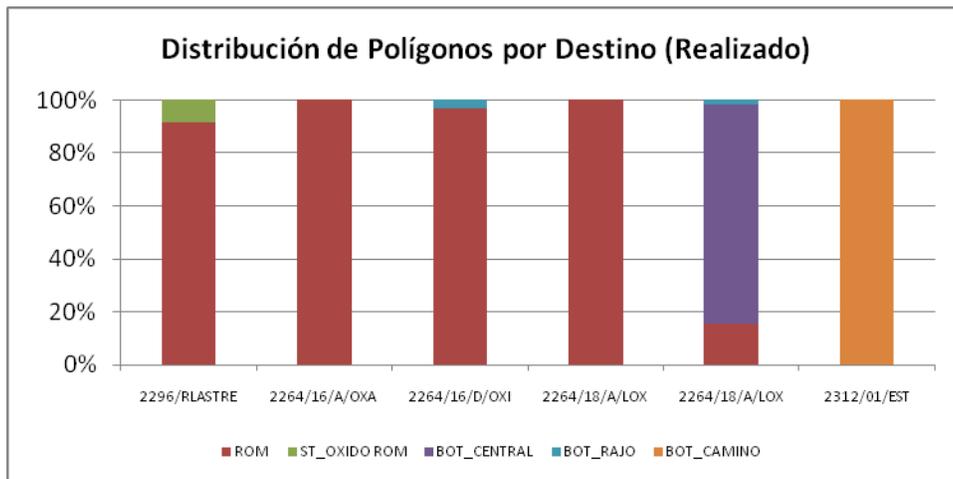


Gráfico 3.4.4-2: Distribución de Destinos por Polígono de Extracción, Realizado (Caso de Estudio)

Es claro que existe una diferencia en cómo se distribuyen los tráficos por ruta. Es necesario recordar que en estos dos casos, equivalen al mismo nivel de producción, pero con un distinto nivel de utilización de equipos.

Con respecto a lo anterior, las siguientes tablas muestran las diferencias entre los viajes propuestos y los reales, con lo que finalmente se refleja el mismo nivel de producción.

<b>Tabla de Viajes Propuestos PL</b>	ROM	ST_OXIDO ROM	BOT_CENTRAL	BOT_RAJO	BOT_CAMINO	Pi
2264/12/A/OXI	0	35	0	0	0	35
2264/14/B/OXI	71	18	0	0	0	89
2264/14/C/OXB	62	0	0	0	0	62
2264/17/D/OXB	138	0	0	0	0	138
2264/18/A/LOX	0	0	87	87	0	174
2312/01/EST	0	0	0	0	4	4
<b># Viajes por Destino</b>	<b>272</b>	<b>53</b>	<b>87</b>	<b>87</b>	<b>4</b>	
<b>Total Viajes</b>	<b>503</b>					

Tabla 3.4.4-1: Viajes Propuestos por Programación Lineal.

<b>Viajes Reales</b>	ROM	ST_OXIDO ROM	BOT_CENTRAL	BOT_RAJO	BOT_CAMINO	Pi
2296/RLASTRE	32	3	0	0	0	35
2264/16/A/OXA	89	0	0	0	0	89
2264/16/D/OXI	60	0	0	2	0	62
2264/18/A/LOX	138	0	0	0	0	138
2264/18/A/LOX	27	0	144	3	0	174
2312/01/EST	0	0	0	0	4	4
<b># Viajes por Destino</b>	<b>346</b>	<b>3</b>	<b>144</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	
<b>Total Viajes</b>	<b>503</b>					

Tabla 3.4.4-2: Viajes Realizados en Caso de Estudio.

Una vez que se obtienen los viajes correspondientes a cada ruta, es posible determinar las distancias totales producto de cada configuración. Estas distancias servirán como referencia para comparar los resultados. Ello finalmente se traducirá en la utilización de recursos.

Las tablas que se muestran a continuación muestran las distancias totales recorridas por la flota de transporte de acuerdo a la configuración de rutas propuestas por la programación lineal y la configuración realizada en el turno real.

<b>Distancia Propuesta [Km]</b>	ROM	ST_OXIDO ROM	BOT_CENTRAL	BOT_RAJO	BOT_CAMINO	Km
2296/RLASTRE	0	316	0	0	0	316
2264/16/A/OXA	722	175	0	0	0	897
2264/16/D/OXI	613	0	0	0	0	613
2264/18/A/LOX	1.399	0	0	0	0	1.399
2264/18/A/LOX	0	0	644	322	0	967
2312/01/EST	0	0	0	0	1	1
<b>Distancia por Destino</b>	<b>2.734</b>	<b>492</b>	<b>644</b>	<b>322</b>	<b>1</b>	
<b>Total Distancia</b>	<b>4.193</b>					

Tabla 3.4.4-3: Distancia Total por Ruta Propuesta por PL.

<b>Distancia Realizada [Km]</b>	ROM	ST_OXIDO ROM	BOT_CENTRAL	BOT_RAJO	BOT_CAMINO	Metros
2296/RLASTRE	316	27	0	0	0	343
2264/16/A/OXA	902	0	0	0	0	902
2264/16/D/OXI	593	0	0	16	0	609
2264/18/A/LOX	1.399	0	0	0	0	1.399
2264/18/A/LOX	275	0	1.067	11	0	1.353
2312/01/EST	0	0	0	0	1	1
<b>Distancia por Destino</b>	<b>3.486</b>	<b>27</b>	<b>1.067</b>	<b>27</b>	<b>1</b>	
<b>Total Distancia</b>	<b>4608</b>					

Tabla 3.4.4-4: Distancia Realizada (Caso de Estudio).

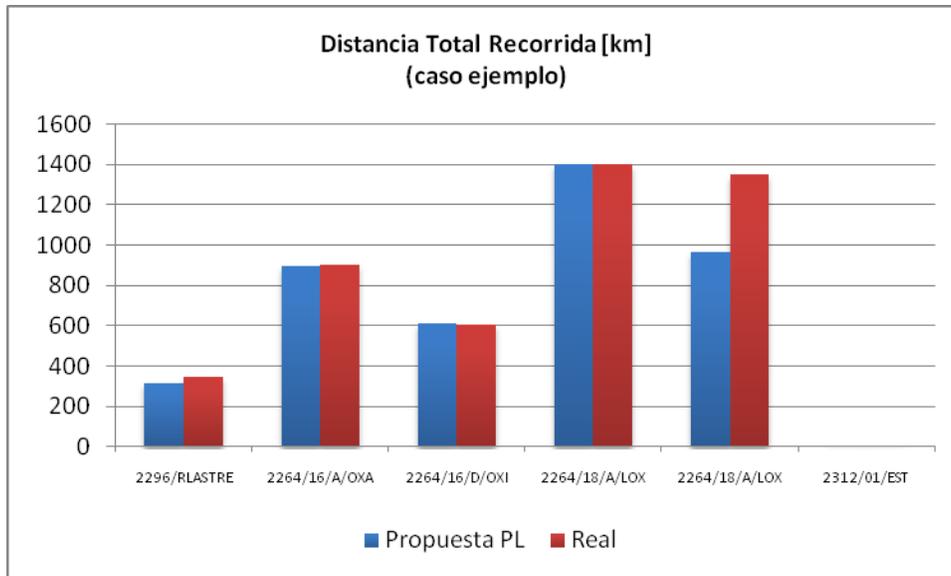


Gráfico 3.4.4-3: Distancia Total Recorrida [Km] (Caso Estudio)

Las configuraciones recién desplegadas indican una diferencia en las distancias totales recorridas del orden de 415 km, lo que muestra que la configuración propuesta (para este caso ejemplo) es 9% inferior a la distancia total real recorrida. Todo lo anterior, a un mismo nivel de producción, por lo que se ha forzado la utilización de recursos a un nivel sobre el necesario. El análisis de costos consecuencia de esta sobre-utilización es lo que se mostrará en el siguiente sub-capítulo.

### 3.4.5 Análisis Económico de Resultado

Cuando el sistema de optimización de despacho minero propone una configuración, lo hace en base a obtener los tamaños de flota de transporte y las rutas correspondientes, de modo de obtener los mejores resultados en cuando a costo y eficiencia (en la utilización de recursos), además de satisfacer los requerimientos de carguío. Esto significa que no estar en el nivel óptimo implica una diferencia (en costo) que impacta

directamente a la renta económica capturada por una planificación, la que sí considera (o debe considerar), niveles efectivos y eficientes de producción.

Esta diferencia significa un costo implícito y asumido por cada turno y que no es considerado en la evaluación anual.

Para analizar esta sobre-utilización de recursos se ha recurrido al modelo de costos planteado en el capítulo anterior. Las diferencias en cuanto a la configuración propuesta y la realizada, surgidas de esta metodología son expresadas en distancias de utilización de flota de transporte, lo cual hace posible establecer los costos asociados a recorrer esta diferencia según el modelo de costos definido.

La estimación de este costo se realiza en base a utilización de combustible y neumáticos, siendo estos los insumos básicos de la flota de transporte.

#### *3.4.5.1 Utilización de Recursos*

Los niveles de consumo de combustible que se expresan en el gráfico desplegado en el capítulo de antecedentes, que son mostrados tanto en Hora Operativa como en Distancia, lo cual permiten traducir directamente el consumo asociado, pero a distintos niveles de velocidad de consumo (lo que se expresa en Km/Hora operativa). Lo mismo sucede en el caso de el uso de neumáticos, en donde a través de los ciclos de vida, es posible establecer el consumo correspondiente al diferencial entre lo óptimo y

realizado, y así poder evaluar la brecha hacia la frontera de producción y las oportunidades que entrega una provechosa utilización de un sistema de administración.

Para poder evaluar esta oportunidad, vale la pena cuantificar ésto a partir del impacto que significa a mayores periodos de tiempo. El evaluar turno a turno significa un complejo escenario de variables a considerar, lo que dificulta una correcta interpretación de los resultados, debido a que las circunstancias que se manejan en cada turno son diversas y particulares.

Aún así se han evaluado una serie de periodos (días), con resultados muy diversos, pero que finalmente significan un valor determinista y propio del momento, por lo que no permiten proyectar a un mayor tiempo.

Como solución a ésto, se ha aplicado una simulación de Monte Carlo (13) de manera de obtener resultados en un periodo de un año, en base a variables, y asumiendo distribuciones supuestas.

#### *3.4.5.2 Simulación de Monte Carlo*

Según el análisis determinista hecho en base a la evaluación de una serie de días se ha podido estimar un nivel de porcentaje de diferencia (entre lo realizado y el óptimo) con que se ha llegado a un **valor referencial** que será parte de los supuestos de la simulación.

Las variables han considerado el caso de estudio y han sido analizadas según su comportamiento por lo que se ha definido una distribución probabilística y los rangos de alcance de cada una, como supuesto base.

Variable	Unidad	Distribución	Media	Desviación Estándar
<b>Nivel de Brecha</b>				
Diferencia porcentual	%	Log normal	6	3
<b>Indicadores</b>				
Distancia media	m	Normal	3.900	800
Movimiento Tpd	ton	Normal	200.000	10.000
Factor de Carga	ton	Normal	387	10
<b>Consumos</b>				
Combustible	Litros/Km	Log normal	12	1
Ciclo Vida Neumático	Km	Log normal	58.800	35280
<b>Costos</b>				
Costo Combustible	Sud/Litro	Log normal	0,6	0,02
Costo Neumático	USD/Unidad	Normal	77.927	3.000

Tabla 3.4.5-1: Variables y sus Distribuciones a Considerar en la Simulación.

Como se observa dentro de la tabla de variables consideradas en la simulación, solo se utilizan Distancia Media, Tonelaje de movimiento diario y factores de carga. Esto permite escalar la simulación a distintos tamaños de mina, por lo cual se hace más flexible el cálculo.

Los resultados de la simulación evidencian el nivel de costo asociado a los parámetros expuestos, y sus distribuciones. Por lo que se ha llegado a una distribución de costos totales anual.

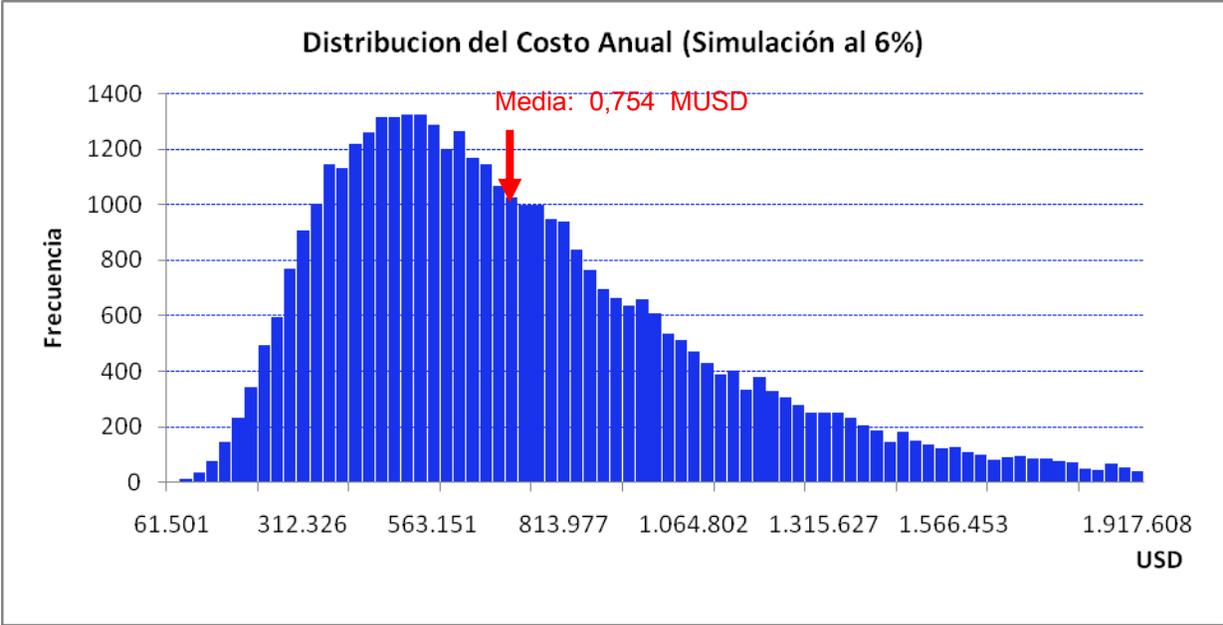


Gráfico 3.4.5-1: Distribución de Costos Asociados a Simulación.

El gráfico recién desplegado, muestra la distribución de costos según los parámetros de simulación establecidos. Con ello es posible observar el amplio rango bajo el cual se sitúan los posibles valores de costo, con una media de **754 mil dólares al año**. Esto evaluado a una **diferencia media con respecto al óptimo de 6%** (según la tabla de parámetros presupuestos).

Parámetros Estadísticos	Valores Pronosticados
Numero de Simulaciones	40.000
Media [USD]	754.121
Mediana [USD]	659.401
Desviación Estándar	420.010
Asimetría Estadística	1,76
Curtosis	8,75
Coficiente de variabilidad	0,5570
Mínimo [USD]	48.959
Máximo [USD]	6.184.105
Error Medio Estándar [USD]	2.100

Tabla 3.4.5-2: Resumen de Parámetros Estadísticos de la Simulación (6%).

En este primer análisis se ha querido ser conservador con respecto a esta diferencia, pero en la realidad se han observado diferencias superiores.

Es difícil proyectar un valor de porcentaje de diferencia que refleje el comportamiento real de un conjunto limitado de periodos, por lo cual se hace útil visualizar las distribuciones a distintos niveles de diferencia.

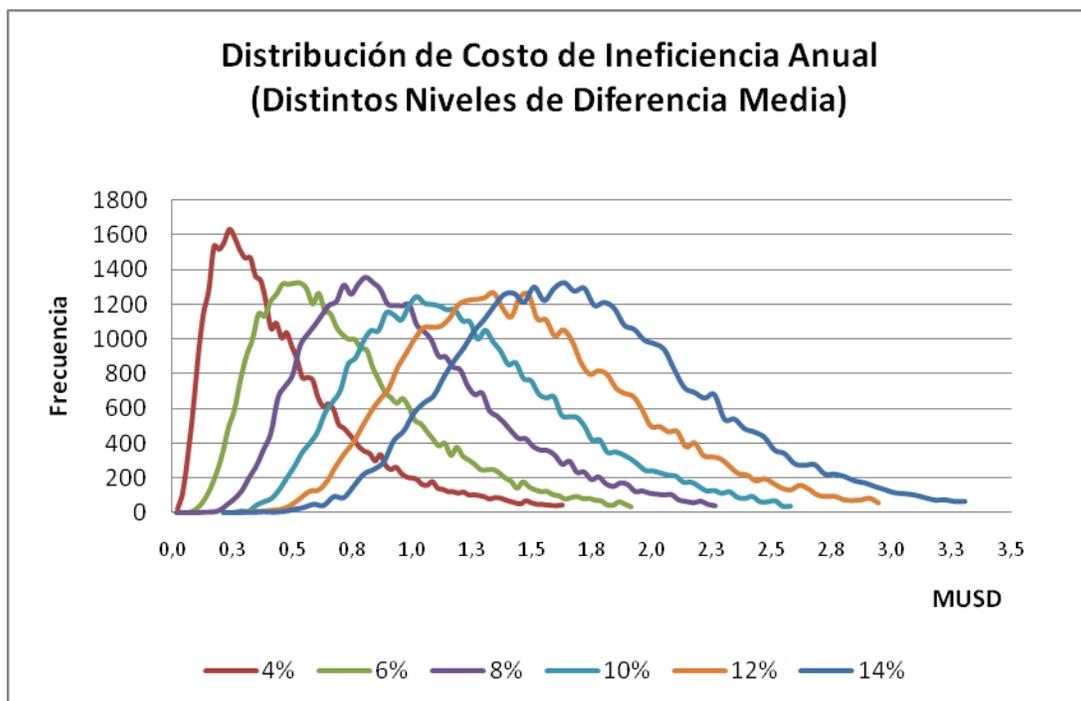


Gráfico 3.4.5-2: Distribución de Costo de Ineficiencia Anual.

Las empresas evalúan los costos asociados a las ventas no realizadas, como un costo oportunidad que lo asumen dentro de sus flujos de caja como pérdida. En este caso esta diferencia es asociada a operar con recursos por sobre los necesarios, por lo que se le puede llamar costo de ineficiencia, solo atribuible a al concepto de asignación de

flota en base a la utilización de recursos e insumos. Lo que significa además un costo oportunidad, en base a la rentabilidad potencial que se le podría dar a estos recursos.

Porcentaje Medio de Diferencia %	Costo Medio Anual de Ineficiencia MUSD	Costo Medio Anual de Oportunidad (15% Rentabilidad) MUSD
2	0,25	0,29
4	0,50	0,58
6	0,75	0,87
8	1,00	1,15
10	1,25	1,44
12	1,51	1,73
14	1,76	2,02
16	2,01	2,31
18	2,26	2,60
20	2,51	2,88

Tabla 3.4.5-3: Costo Medio Anual de Ineficiencia y Costo Medio Anual de Oportunidad Asociado a un rango de diferencia porcentual de utilización de recursos, entre la operación y la frontera de producción.

De existir un comportamiento continuo que posibilite la existencia de estos espacios entre los niveles óptimos de utilización de recursos y los reales, se pueden visualizar impactos directos en los costos de producción. Si bien pueden resultar mínimos en comparación a los costos totales, es su valor acumulado a lo largo de un proyecto, lo que justifica la correcta utilización de sistemas de optimización de flota.

Al proyectarse un flujo de caja por el periodo total del proyecto, teniendo como supuesto un aumento en un 2% anual de la distancia media, con el nivel de movimiento constante y utilizando el mismo modelo de costo, a una brecha de ineficiencia de un

6% con respecto a la frontera de producción, y con una rentabilidad del 10% de la mejor utilización alternativa de los recursos se obtienen los siguientes resultados

Año	Costo Ineficiencia por año KUSD	Rentabilidad 10% sobre mejor utilización de recursos KUSD	Costo Oportunidad Anual KUSD
1	753	0	753
2	768	75	843
3	783	160	943
4	799	254	1.052
5	815	359	1.174
6	831	476	1.307
7	848	607	1.455
8	865	753	1.617
9	882	914	1.796
10	899	1.094	1.993
11	917	1.293	2.211
12	936	1.514	2.450
13	954	1.759	2.714
14	974	2.031	3.004
15	993	2.331	3.324

Tabla 3.4.5-4: Flujo de Caja Asociado al Costo oportunidad.

Para un periodo de 15 años se obtiene un Costo Oportunidad a valor actual de:

<b>Costo Oportunidad Total <sup>10</sup>(VA) 11,23 MUSD</b>
---

<sup>10</sup> Hay que considerar que este valor es referencial, por lo que asume los supuestos establecidos en la simulación.

Si bien el costo por año es “bajo”, el costo resultado de una gestión continua, es de gran importancia<sup>11</sup>, lo cual justifica realizar la gestión que permita de revertir este resultado.

Este análisis permite apreciar la brecha de oportunidad de mejora que tienen los procesos productivos y cómo estos costos pueden ser atribuibles a las decisiones y situaciones que dieron pie a que se suscitaran. Por ejemplo: una mala planificación en el tamaño de flota, indicadores operacionales de planificación que tengan una desviación del óptimo en cuanto a la utilización de los recursos de manera eficiente, contratos de mantención que exijan un nivel de disponibilidad, que posibilite situaciones donde capacidad de transporte que sobrepase las capacidades de carguío, políticas de incentivos que apunten a la utilización efectiva de recursos, pero no eficiente.

Finalmente este trabajo muestra como evidenciar esta oportunidad de mejora dentro de los procesos productivos. Ello revela el valor de lograr movilizar la operación hacia la frontera de producción, a fin de lograr concretar y defender la renta económica.

---

<sup>11</sup> Con este nivel de costo, se podría financiar hasta dos camiones de extracción.

## 4 Discusión y Conclusiones

Los sistemas de despacho y administración minera, sin duda han sido un avance en cuanto las posibilidades de gestión que entrega a la operación del proceso minero de extracción. Es claro que este aporte ha servido a reducir los requerimientos de flota de transporte y optimizar las configuraciones, de modo de obtener los resultados perseguidos por los planes de producción. Estos sistemas proponen una configuración de flota, la cual significa una utilización óptima de recursos lo que permite acercar la operación, hacia la frontera de producción, por lo que cualquier desviación de esta configuración significa un costo oportunidad asociado a la una mejor utilización de esos recursos involucrados.

El análisis realizado en este trabajo aborda desde las características propias del negocio minero y su estrategia, además de visualizar ciertos elementos que desvían los intereses que se manifiestan en los procesos productivos. De modo que existe una brecha que es posible evidenciar tanto producto de la utilización que se le dá a los sistemas de despacho y administración minera, como de la utilización de los recursos con los cuales se lleva a cabo la extracción.

Se ha establecido los indicadores de gestión involucrados en la captura y agregación de valor. Con ello ha sido posible generar un modelo de gestión a partir del cual se indican los criterios con los que la operación se debe alinear, de modo de obtener la renta económica, capturada por el plan minero.

De manera exploratoria, se ha analizado los distintos enfoques de gerenciamiento con los cuales se dirige la operación, con el objetivo de comprender los niveles de gestión con los que se enfrenta cada turno, y así poder reconocer los criterios con los que finalmente utilizan los sistemas de despacho.

Como parte de este trabajo se ha analizado las distintas herramientas que componen un sistema de despacho y administración minera, y con ello poder diagnosticar el grado de conocimiento de estas y su utilización. Junto a esto se ha podido establecer un análisis de causalidad, así poder evidenciar las falencias que impiden una correcta utilización del sistema.

El diagnostico principal que se ha obtenido sobre la utilización de los sistemas de despacho, es que se ha observado un desconocimiento (por parte de quienes los operan) de la función objetivo que tienen los sistemas de optimización de flota, por lo que en muchos casos se persiguen objetivos divergentes a lo que realmente significa optimizar la utilización de los recursos.

Se hace necesario que las personas que operan estos sistemas posean el entrenamiento adecuado, debido a que es en esta plataforma donde se administra las mayores inversiones (en cuanto a equipos) y costos, por lo es clave la preparación para poder sacarle el mejor provecho tanto a las herramientas de gestión, como a los recursos con los que se cuenta. Otro de los elementos importantes en cuanto a la

utilización de los sistemas de despacho, son los procedimientos de actualización de la información y configuración de las restricciones, ya que estos pasos son los que aseguran el correcto funcionamiento del sistema de asignación.

Una vez observadas las deficiencias de la utilización de los sistemas, es necesario el poder apreciar de manera cuantitativa la oportunidad de mejora, por lo que a través de un modelo de programación lineal empleado por los mismos sistemas de despacho, se ha elaborado una metodología que permite evaluar y cuantificar la brecha que existe entre la utilización óptima, y la utilización real de recursos. Esta metodología expresa diferencias en cuanto a configuración de rutas y distancias, finalmente estas diferencias se traducen en recursos utilizados para satisfacer los mismos niveles de producción lo que significa un costo ineficiencia. Este costo de ineficiencia, en otras palabras implica un costo oportunidad debido a los posibles usos de estos recursos.

Cuando se tiene conocimiento de que existe una pérdida asociada a este costo de oportunidad, la conducta obvia a seguir es la búsqueda de una mejor gestión, de modo de poder acercar la operación hacia la frontera de producción y reducir esta brecha al mínimo nivel posible. Esto solo se podrá lograr alineando los criterios e indicadores que permitan defender la renta capturada por el plan, de modo de no desviar recursos de forma innecesaria.

Con respecto al caso de estudio se ha podido observar diferencias reales entre la configuración propuesta por la programación lineal y lo realizado. Estas diferencias acumuladas a largos periodos de tiempo implican costos considerables que finalmente justifican la inversión de un plan de mejoramiento continuo de manera de llevar la operación hacia la frontera de producción.

La metodología propuesta, colabora efectivamente en poder visualizar la brecha hacia el óptimo, y con ello poder evaluar el desempeño de la operación, por lo que significa un aporte y una tremenda oportunidad de redirigir la operación hacia los niveles de efectividad y eficiencia con los que se diseñó el plan.

## 5 Bibliografía

1. **Zhang, Ying, y otros.** *Optimization model of truck flow at open-pit mines and standars for feasibility test.* s.l. : Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004. Vols. 11, pp.389-393.
2. **Wang, Qiang, et al.** *Open-pit Mine Truck Real-time Dispatching Principle under Macroscopic Control.* Beijing : First International Conference on Innovative Computing, Information and Control, 2006. pp. 1-4.
3. **Clevenger, J. G.** *DISPATCH reduces Mining Equiment Requirements.* s.l. : Mining Engineering, 1983. Vols. 35, pp. 1277-1280.
4. **Ramirez, Felipe.** *Diseño de un Sistema de Control del Plan Minero.* Santiago : Universidad de Chile, Departamento de Ingenieria de Minas, 2008. Memoria para optar al titulo de Ingeniero Civil de Minas.
5. **Adams, Robin.** *Strategic Challenges For The Australian Minerals And Energy Sectors.* Camberra, Australia : s.n., 1998.
6. **Lambin, Jean-Jacques.** *Market Driven Management.* Londres : Mac Millan Press Ltd, 2000.
7. **Besanko, David, y otros.** *Economics of Strategy.* New Jersey : Wiley, 2004.

8. **Fernández, Juan y Duch, Néstor.** *Economía Industrial, Un Enfoque Estratégico.* Barcelona : Mc Graw Hill.
9. **Ayuso, Alberto Reynaldo.** Eficacia y Eficiencia. *Winred.* [En línea]  
<http://winred.com/management/eficacia-y-eficiencia/gmx-niv116-con1409.htm>.
10. **Alarie, Stéphane y Gamache, Michel.** *Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines.* s.l. : Taylor & Francis, 2002. Vols. 16:1, pp. 59-76, International Journal of Mining, Reclamation and Environment.
11. **White, J.W. y Olson, J.P.** *Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives.* s.l. : Mining Engineering, 1986. Vols. 183, pp.1045-1054.
12. **Oliva, Rene y Diaz, Hugo.** *Modelo Técnico de Gestión.* Santiago : s.n., 2009.
13. **CostMine.** *Mine and Mill Equipment Cost: An Estimator's Guide.* s.l. : InfoMine USA, Inc. in cooperation with Aventurine Engineering, Inc., 2007.
14. **Boiteux, Orlando Dante, Corominas, Albert y Lusa., Amaia.** *La Planificación Agregada como Instrumento Integrador de las Áreas Funcionales de la Empresa: Estado del Arte y Perspectivas.* s.l. : International Conference on Industrial Engineering & Industrial Management , 2007.
15. **Bridgestone.** How to use Ton-Kilometre per Hour. [En línea]  
<http://www.firestone.co.za/content.asp?id=186>.

16. **Wikipedia1**. Metodo de Monte Carlo. [En línea]

[http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_Monte\\_Carlo](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Monte_Carlo).

17. **Wikipedia2**. Algoritmo de Dijkstra. [En línea]

[http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo\\_de\\_Dijkstra](http://es.wikipedia.org/wiki/Algoritmo_de_Dijkstra).

18. **Albarenga, G.B., G.R., Mateus y de Tomi, G.** *A genetic and Set Partitioning Two-phase Approach for the Vehicle Routing Problem with Time Windows*. s.l. : Journal Computers & Operations Research, 2006. Vols. 6, pp. 1561-1584.

19. **Pereira da Costa, Felipe.** *Aplicações de técnicas de otimização a Problemas de planejamento operacional de Lavra em minas a céu aberto*. Ouro Preto : Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, 2005.  
Tesis conducente al título de Mestre em Engenharia Mineral.

## 6 Anexos

### 6.1 Algoritmo de Optimización

La historia de los sistemas de despacho se remonta a 1982, cuando M.J. Arnold, J.W. White y J.P. Olson desarrollaron un algoritmo (9) (3) que pretendía solucionar la asignación de camiones minimizando los requerimientos de equipos.

Primero que todo se solucionaba el problema de la mejor ruta (Best Path, BP) a través de un algoritmo Dijkstra (14). Posterior a ello la optimización se realiza a través de programación lineal (LP) y dinámica (LD).



Figura 3.4.5-1: Diagrama de Algoritmo de Optimización While-Olson.

La programación lineal soluciona el problema general y minimiza los requerimientos de equipos, mientras que la programación dinámica se encarga de la asignación de los flujos por ruta.

En la actualidad las principales empresas que desarrollan sistemas de despacho son:

- Modular Mining Systems : DISPATCH
- Jigsaw Technologies : MineOPS
- Wenco International Mining Systems
- Devex: SmartMine
- Caterpillar Finning: MineStart

Las principales diferencias son la tecnología utilizada, los algoritmos, y el procesamiento de la información.

En el caso de las primeras tres, utilizan un algoritmo similar al propuesto por White-Olson, en el caso de Devex la solución del mismo problema se aproxima a través de la simulación producto de un algoritmo de optimización genético desarrollado por Alvarenga (15).

Felippe Pereira da Costa (16), realizó un estudio de los algoritmos utilizados en la asignación de flujos por ruta, de este estudio junto con el algoritmo desarrollado por J. Olson (9), viene Modelo Optimizante que permite visualizar de manera estática las opciones de una operación dada sus circunstancias en un periodo determinado.

El modelo que se describe a continuación es el que finalmente se utiliza en este trabajo.

### 6.1.1.1 Función Objetivo:

La función objetivo planteada propone minimizar los flujos de transporte por ruta, esta función incluye las prioridades de cada punto de extracción y descarga, y los tiempos correspondientes por ruta:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{i=N_s} (P_i \cdot (T_i - Z_i)) + \sum_{j=1}^{j=N_d} (P_j \cdot (T_j + D_j + Z_j))$$

Donde:

- P<sub>i</sub> Tasa de alimentación por punto de extracción, que pasa por ruta i; t/hr
- T<sub>i</sub> Tiempo de viaje por ruta i; hr
- Z<sub>i</sub> Coeficiente de prioridad por ruta i que viene desde carguío; hr
- N<sub>s</sub> Numero de rutas factibles desde los puntos de descarga hasta los puntos de extracción.
- P<sub>j</sub> Tasa de alimentación por punto de descarga por ruta j; t/hr
- T<sub>j</sub> Tiempo de viaje por ruta j; hr
- D<sub>j</sub> Tiempo de descarga en el j punto de descarga; hr
- Z<sub>j</sub> Coeficiente de penalidad de remanejo (Z<sub>i-1</sub>) (solo para stockpiles); hr
- N<sub>d</sub> Número total de puntos de descarga disponibles.

### 6.1.1.2 Restricciones:

Las restricciones propias de esta función objetivo se definen a continuación:

1. Continuidad de flujos entre lo que se transporta desde un punto de extracción y llega a los puntos de descarga:

$$0 = \sum_{i=1}^{i=N_{pi}} P_i - \sum_{j=1}^{i=N_{po}} P_j$$

2. Sujeto al máximo rendimiento por equipo de extracción, es decir que la suma de todos los flujos que sale de un punto de extracción es menor o igual a la tasa de extracción.

$$R_j \geq \sum_{k=1}^{k=Np} P_k$$

3. Sujeto al máximo rendimiento por punto de descarga, es decir que la suma de todos los flujos que entran a un punto de descarga es menor o igual a su tasa máxima de descarga, esta tasa ya sea por decisiones operacionales o capacidad.

$$D_j \geq \sum_{k=1}^{Np} P_k$$

4. Sujeto a la capacidad de transporte (LPMATCHTRUCK), esto se refiere a que todo el movimiento de flujos de transporte no supere la capacidad de transporte disponible.

$$T_{ac} \geq \sum_{i=1}^{i=Np} (P_i \cdot T_i) + \sum_{j=1}^{j=Nd} (P_j \cdot D_j) + \sum_{k=1}^{k=Np} (P_k \cdot L_i)$$

5. Sujeto a un modelo de mezcla, predefinido según parámetros mínimos y máximos aceptables por punto de descarga.

$$X_{jkl} \leq X_{jka} + \sum_{i=1}^{Npj} (X_{ik} - X_{jka}) \cdot \frac{P_i \cdot T_c}{M_{cj}} \leq X_{jku}$$

$X_{jkL}$	Límite inferior del k-esimo parámetro de mezclamiento en planta
$X_{jkA}$	Actual valor promedio entrante del k-esimo parámetro de mezclamiento.
$X_{ik}$	Valor del k-esimo parámetro de mezclamiento en la ruta i.
$P_i$	Flujo de transporte desde la ruta i hacia descarga ; t/hr
$T_c$	Tiempo de intervalo de control; hr
$M_{cj}$	Masa de control de mezcla del j punto de descarga; t
$X_{jkU}$	Límite superior del k-esimo parámetro de mezclamiento en la ruta j.
$N_{pj}$	Número de rutas entrantes por punto de descarga con restricción de mezcla.

6. Sujeto a restricciones de autorización de acceso a ciertas rutas por ciertos puntos de extracción.

## 6.2 Herramientas del Sistema

Como modo de ejemplo se muestran a continuación la visualización de las herramientas con las que cuenta Jigsaw Technologies con su sistema de administración minera MineOPS.

### 6.2.1 Pantalla de Rutas

En la pantalla de ruta es posible apreciar la configuración de flota propuesta por la programación lineal y la diferencia con respecto a la cantidad de equipos que se están utilizando en tiempo real.

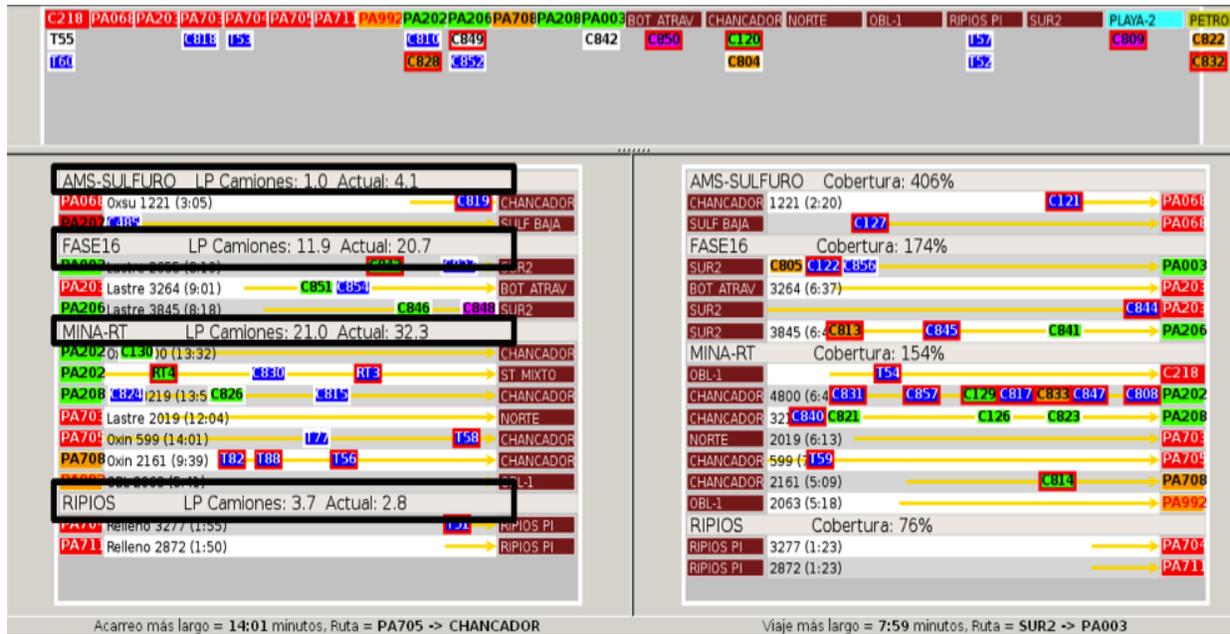


Figura 6.2.1-1: Pantalla de Ruta MineOPS.

## 6.2.2 Dashboard

En el Dashboard es posible visualizar los indicadores en tiempo real, lo que permite realizar una gestión con mayor sensibilidad, y poder ajustar las capacidades de transporte según las capacidades de carguío que se van teniendo durante el turno, de modo de lograr una mejor utilización de recursos.



Figura 6.2.2-1: Dashboard MineOPS.