



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

**METODOLOGÍA DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN DESARROLLOS DE
MINERÍA SUBTERRÁNEA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

DAVID SEBASTIÁN LAVADO ABARZÚA

**PROFESOR GUÍA:
JUAN LUIS YARMUCH GUZMÁN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EDUARDO BRAVO MUÑOZ
NELSON MORALES VARELA**

SANTIAGO DE CHILE
2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas.

POR: David Sebastián Lavado Abarzúa.

FECHA: Junio, 2014.

PROFESOR GUÍA: Juan Luis Yarmuch.

METODOLOGÍA DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS EN DESARROLLOS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA

La Mina Esmeralda es uno de los sectores de explotación que componen la División El Teniente, en el cual trabaja tanto personal de Codelco como empresas contratistas. La principal labor de estas últimas es la preparación minera.

El objetivo de este trabajo es construir una metodología que resuelva la problemática de la asignación de recursos en los turnos de trabajo de las obras de desarrollo horizontal, considerando múltiples frentes de preparación minera. La actual gestión de recursos es elaborada manualmente por el Jefe de Turno a comienzos de la jornada. Esta función se realiza en forma intuitiva y no logra maximizar los tiempos efectivos de trabajo de las cuadrillas de mano de obra.

El presente modelo define las etapas del ciclo de desarrollo como secuenciales e invariantes. Conociendo el tiempo de ciclo de cada operación unitaria, es posible predecir el momento en que cada etapa en particular del ciclo es completada y cuando se debe comenzar la siguiente. Bajo este concepto, la complejidad del problema aumenta conforme se multiplican los frentes en operación y aumenta la cantidad de equipos.

Luego de proponer y analizar distintos modelos para abordar el problema, se seleccionó el que cumple con todos los requisitos. Éste permite alcanzar una mejora de hasta un 65% sobre la gestión realizada en el caso de estudio, sin necesidad de recursos adicionales. Además se puede recuperar cerca de un 10% del tiempo útil del ciclo si se sistematiza la asignación.

Adicional a lo anterior, se estudia la respuesta del plan de corto plazo extendiendo el modelo mediante simulación de eventos discretos no determinísticos, incorporando la variabilidad de las etapas del ciclo y la disponibilidad mecánica. La variable estudiada es la disponibilidad de frentes de trabajo, entregadas por el plan de corto plazo, sobre las que el algoritmo puede distribuir los equipos. De la simulación se concluye que el plan de corto plazo de la empresa no está pensado en maximizar utilización de los recursos actuales de la obra.

El uso de la metodología propuesta presenta un gran potencial de mejora en la efectividad de la operación, además de un aumento del tiempo disponible para trabajo efectivo gracias a la automatización de la asignación.

ABSTRACT

Esmeralda Mine is one of the many sectors in operation that integrate the “El Teniente” Division, where Codelco’s workforce labor as well as contractor companies, being the mine development the main task of the lasts.

This assignment has the objective of building a methodology that solves the resources assignment problem during the work shifts in horizontal underground mining development, considering multiple mining development fronts. The existing resource assignment is manually worked out by the Shift Manager at the beginning of the day, not being able to maximize the resource assignment and effective work time of the employees.

The present model defines the stages of the horizontal development cycle as sequential and invariant, whereas, knowing the cycle time of each unitary operation, it is possible to predict the moment at which every particular stage of the cycle is completed and a new assignment is needed to begin the next one. Under this concept, the complexity of the problem increases as the operation diversifies in more working fronts and the number of machines increases.

After proposing and analyzing different approaches, the one that fulfills all the initial requirements and gives an increase in the efficiency of up to 65% over the management executed in the best case, without need of additional resources, is selected. The resource assignment is delivered in much less time compared to the manual assignment worked out by the Shift Manager. About 10% of the working day’s useful time can be recovered if the assignment is automated.

The short term plan response is analyzed, extending the initial model to a 30 days timespan using stochastic discrete event simulation. This stage incorporates the randomness of each stage of the cycle, besides the characteristic mechanical availability of each working machine. The studied variable is the development fronts availability, given by the short term plan, over which the algorithm can allocate the machines. Upon analyzing the results of the simulation, it is seen that the short term plan is not designed to maximize the use of the current operation resources.

Even under a pessimistic scenario, in terms of machine availability, it is possible to reach the program requirements in most of the cases. The use of the proposed methodology features a great improvement potential in the effectiveness of the whole operation for this kind of mining developments. On top of that, there can be a substantial increase of the available time for effective work during the day due to assignment automation.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres por haberme impulsado a enfrentar el desafío de estudiar ingeniería, por su apoyo incondicional, y por su incansable insistencia en inculcarme el sentido de la responsabilidad.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción.....	1
1.1	Motivación del trabajo.....	1
1.1.1	Niveles de actividad.....	2
1.1.2	Tiempos medios durante el turno.....	3
1.2	Objetivos.....	8
1.2.1	Objetivo General.....	8
1.2.2	Objetivos Específicos.....	8
1.3	Alcances.....	9
2.	Antecedentes.....	10
2.1	Antecedentes generales.....	10
2.1.1	Descripción de la faena.....	10
2.1.2	Distribución de labores.....	12
2.1.3	Método de explotación.....	13
2.1.4	Configuración espacial de niveles.....	18
2.1.5	Ciclo de avance en galerías.....	21
2.2	Antecedentes específicos.....	25
2.2.1	Despacho en minería a cielo abierto.....	25
2.2.2	Despacho en minería subterránea.....	29
2.2.3	Despacho en preparación minera subterránea.....	31
2.2.4	Patrones de trabajo actuales.....	32
2.3	Programación Lineal.....	33
2.3.1	Descripción general.....	33
2.3.2	Representación del modelo.....	33
2.3.3	Herramientas existentes.....	34
2.3.4	GNU Linear Programming Kit.....	39
3.	Metodología.....	40
4.	Desarrollo.....	41
4.1	Formulación del modelo.....	41

4.1.1	Parámetros de entrada	41
4.1.2	Simplificaciones	42
4.1.3	Objeto de maximización o minimización	44
4.1.4	Definición de Frentes Equivalentes	45
4.2	Caso de estudio	46
4.2.1	Condiciones iniciales	46
4.2.2	Plan de corto plazo	46
4.2.3	Realidad operacional	48
4.3	Modelo matemático	50
4.3.1	Programación lineal	52
4.3.2	Programación entera.....	54
4.3.3	Programación entera con post-proceso	57
4.4	Modelo heurístico	59
4.4.1	Plan de corto plazo	61
4.4.2	Realidad operacional	61
4.4.3	Limitantes.....	61
4.5	Resultados de los modelos de asignación de recursos.....	62
4.5.1	Plan de corto plazo	62
4.5.2	Caso real.....	63
4.6	Resultado en Frentes Equivalentes	65
4.6.1	Elección del modelo.....	65
4.7	Incorporación de variables aleatorias.....	66
4.8	Simulación no determinística de eventos discretos	71
4.9	Ejecución de la simulación	74
5.	Análisis de resultados	80
5.1	Tiempos de operación	80
5.2	Tiempo de asignación	81
5.3	Confianza de la asignación y disponibilidad mecánica	83
5.4	Comportamiento en escenarios genéricos.....	86
6.	Conclusiones.....	89

7.	Recomendaciones y trabajo futuro	91
8.	Bibliografía.....	93
9.	Anexo A.....	96
10.	Anexo B.....	97
11.	Anexo C.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Niveles de actividad según estudio	2
Figura 1-2: Tiempos medios de actividades principales.....	3
Figura 1-3: Horas de trabajo del turno.....	3
Figura 1-4: Niveles de ocupación de mano de obra sobre el total del turno.....	4
Figura 1-5: Niveles de ocupación de mano de obra sobre la jornada potencial.	5
Figura 1-6: Gráfico de causas de tiempo perdido, jornada potencial.	6
Figura 2-1: Esquema de la distribución de labores en la Mina Esmeralda.....	12
Figura 2-2: Vargas, M. 2012. “Método PC actual”. Curso Diseño Minero. Universidad de Chile.	13
Figura 2-3: Vargas, M. 2012. “Zonas en PC”. Curso Diseño Minero. Universidad de Chile.	14
Figura 2-4: Vargas, M. 2012. “PC con hundimiento previo”. Curso Diseño Minero. Universidad de Chile.	14
Figura 2-5: Vargas, M. 2012. “PC con hundimiento previo”. Curso Diseño Minero. Universidad de Chile.	15
Figura 2-6: Plano de la empresa. 2013. Mina Esmeralda - Layout del Nivel de Hundimiento.	16
Figura 2-7: Plano de la empresa. 2013. Mina Esmeralda - Layout del Nivel de Producción.	17
Figura 2-8: Chacón. 1976. “Malla de extracción tipo Teniente”. Vista en perfil.	18
Figura 2-9: Chacón. 1976. “Malla de extracción tipo Teniente”. Vista en planta.	19
Figura 2-10: Configuración de la malla de extracción	19
Figura 2-11: Configuración del nivel de hundimiento.....	20
Figura 2-12: Ciclo de avance en desarrollos horizontales	22
Figura 2-13: Perno de enganche	24
Figura 2-14: Hardware de la solución SmartMine®.....	28
Figura 2-15: Interfaz DISPATCH® Underground mine management system.....	30
Figura 4-1: Flujo de información de Operaciones en Esmeralda.	41
Figura 4-2: Interrupciones en el ciclo de avance.	42
Figura 4-3: Ciclo de avance reordenado y simplificado.	42

Figura 4-4: Asignación manual.....	59
Figura 4-5: Comparación de resultados de modelos sobre plan de corto plazo.	62
Figura 4-6: Comparación porcentual de resultados sobre plan de corto plazo.	62
Figura 4-7: Comparación de tiempos de ejecución sobre plan de corto plazo.	63
Figura 4-8: Comparación de resultados de modelos sobre caso real.	63
Figura 4-9: Comparación porcentual de resultados sobre caso real.	64
Figura 4-10: Comparación de tiempos de ejecución de modelos sobre caso real.	64
Figura 4-11: Marina - Función de densidad de probabilidad.....	67
Figura 4-12: Fortificación - Función de densidad de probabilidad	67
Figura 4-13: Lechado - Función de densidad de probabilidad	68
Figura 4-14: Malla - Función de densidad de probabilidad.....	68
Figura 4-15: Hilteo - Función de densidad de probabilidad	69
Figura 4-16: Shotcrete - Función de densidad de probabilidad.....	69
Figura 4-17: Perforación - Función de densidad de probabilidad	70
Figura 4-18: Distribución Normal típica	71
Figura 4-19: Utilización promedio de frentes.....	74
Figura 4-20: Utilización promedio de equipos en simulaciones.....	75
Figura 4-21: Tiempo de falla promedio de equipos en simulaciones.	76
Figura 4-22: Comparación de resultados en Frentes Equivalente.	77
Figura 4-23: Convergencia de Frentes Equivalentes	78
Figura 5-1: Comparación de resultados y ejecución del Jefe de Turno.....	81
Figura 5-2: Comparación porcentual de resultados y ejecución del Jefe de Turno.....	82
Figura 5-3: Función densidad de probabilidad. 21 Frentes Disponibles.	83
Figura 10-1: Función densidad de probabilidad. 20 FD, DM 70%.	97
Figura 10-2: Función densidad de probabilidad. 20 FD, DM 80%.	98
Figura 10-3: Función densidad de probabilidad. 20 FD, DM 90%.	99
Figura 10-4: Función densidad de probabilidad. 25 FD, DM 70%.	100
Figura 10-5: Función densidad de probabilidad. 25 FD, DM 80%.	101
Figura 10-6: Función densidad de probabilidad. 25 FD, DM 90%.	102
Figura 10-7: Función densidad de probabilidad. 30 FD, DM 70%.	103
Figura 10-8: Función densidad de probabilidad. 30 FD, DM 80%.	104
Figura 10-9: Función densidad de probabilidad. 30 FD, DM 90%.	105

Figura 11-1: Ventana principal 107

Figura 11-2: Ventana con asignación 108

Figura 11-3: Reporte de equipos..... 108

Figura 11-4: Reporte de frentes 108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Resultados de solvers aplicados a las distintas instancias del benchmark.	37
Tabla 2-2: Tiempos de corrida aplicados a los datos de prueba del benchmark.	37
Tabla 2-3: Tiempo de corrida (escalado) para problemas bidimensionales	38
Tabla 2-4: Tiempo de corrida (escalado) para problemas tridimensionales	38
Tabla 2-5: Tiempo de corrida (escalado) para todos los problemas	38
Tabla 4-1: Tiempos de ciclo de operaciones unitarias.....	45
Tabla 4-2: Condiciones iniciales de labores según plan de corto plazo.	46
Tabla 4-3: Flota de equipos disponibles.	47
Tabla 4-4: Condiciones iniciales de labores según realidad operacional	48
Tabla 4-5: Trabajos realizados en caso base.....	49
Tabla 4-6: Resumen de modelo lineal sobre plan de corto plazo.	52
Tabla 4-7: Resumen de modelo lineal sobre caso real.....	52
Tabla 4-8: Resultados fraccionarios en modelo lineal.....	53
Tabla 4-9: Resumen de modelo entero sobre plan de corto plazo.	54
Tabla 4-10: Resumen de modelo entero sobre caso real.	55
Tabla 4-11: Discontinuidades temporales en modelo entero.....	55
Tabla 4-12: Resumen de modelo entero forzado sobre plan de corto plazo.....	57
Tabla 4-13: Resumen de modelo entero forzado sobre caso real.	58
Tabla 4-14: Velocidad de etapas del ciclo de avance	59
Tabla 4-15: Asignación de índices a etapas.....	60
Tabla 4-16: Parámetros de distribución para simulaciones	71
Tabla 4-17: Disponibilidad mecánica de equipos.....	72
Tabla 4-18: Convergencia de Frentes Equivalentes	79
Tabla 5-1: Estadísticas básicas. 21 Frentes Disponibles.....	83
Tabla 5-2: Intervalos de confianza. 21 Frentes Disponibles.....	84
Tabla 5-3: Resultado de Frentes Equivalentes con una confianza del 99%	85
Tabla 5-4: Resultado de Frentes Equivalentes con una confianza del 90%	85
Tabla 5-5: Resultado de Frentes Equivalentes con una confianza del 50%	85
Tabla 5-6: Condiciones iniciales aleatorias para las frentes de trabajo	86
Tabla 9-1: Función de distribución de la variable Normal(0,1)	96

Tabla 10-1: Intervalos de confianza. 20 FD, DM 70%.....	98
Tabla 10-2: Intervalos de confianza. 20 FD, DM 80%.....	99
Tabla 10-3: Intervalos de confianza. 20 FD, DM 90%.....	100
Tabla 10-4: Intervalos de confianza. 25 FD, DM 70%.....	101
Tabla 10-5: Intervalos de confianza. 25 FD, DM 80%.....	102
Tabla 10-6: Intervalos de confianza. 25 FD, DM 90%.....	103
Tabla 10-7: Intervalos de confianza. 30 FD, DM 70%.....	104
Tabla 10-8: Intervalos de confianza. 30 FD, DM 80%.....	105
Tabla 10-9: Intervalos de confianza. 30 FD, DM 90%.....	106

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación del trabajo

En el sector Esmeralda de la mina El Teniente de Codelco, se desarrolla la etapa de preparación minera con personal externo. Contando para ello con un contrato que comprende un avance lineal equivalente de 450 metros mensuales, y una descarga de hormigón de 2.000 m³ por 5 años.

Cumplir la planificación es de fundamental importancia para la empresa, pues de ello dependen sus ingresos mensuales. Además, la realización de las obras de preparación minera es la condición previa para que el personal de Codelco ejecute el plan de producción. Contractualmente, esta importancia se expresa en multas por atrasos e incumplimientos para la empresa contratista

Parte del plan de mejora contempla el trabajo en conjunto con Gepuc¹, un programa de investigación colaborativa, por orden del mandante. Este incluye la recopilación de datos referentes a las distintas operaciones unitarias para realizar un posterior análisis cuantitativo e identificar las principales falencias.

GEPUC sólo presta asesoría externa, dejando tanto las mediciones como el análisis de datos a cargo de la empresa contratista. Esto se lleva a cabo de forma interna en un área llamada Sistema Integrado de Gestión (SIG) de la empresa contratista.

A continuación se resumen las principales características del levantamiento llevado a cabo, necesarias para estandarizar la información con la que se trabajó. También se presentan sus resultados más concluyentes.

¹ Centro de Excelencia en Gestión de la Universidad Católica.

1.1.1 Niveles de actividad

Para efectos del levantamiento, se entenderá como niveles de ocupación al grado de utilización en forma porcentual o absoluta de un proceso o recurso (Ej: perforación, mano de obra, maquinaria, etc).

Se encuentra dividido en 4 categorías, que corresponden a:



Figura 1-1: Niveles de actividad según estudio

1.1.1.1 Agrega Valor (Trabajo Productivo)

Trabajo que aporta en forma **directa a la producción agregando unidades al proceso**, incluyendo actividades como la colocación de pernos o shotcrete, transporte de marina a sectores de acopio o puntos de vaciado, operación de jumbo, etc.

1.1.1.2 Detención planificada o autorizada (Trabajo no contributivo)

Señala los tiempos de **detenciones** en la jornada laboral que corresponde a actividades necesarias pero indirectas, como planificación, charlas de seguridad, colación, cambio de ropa, traslados a la frente², entre otros.

1.1.1.3 Apoyo y transferencia (Apoyo contributivo)

Trabajo de **apoyo**, que debe ser realizado para que pueda ejecutarse la actividad que agrega valor (necesario). Ejemplo: recibir o dar instrucciones para la actividad en ejecución, trasladar equipo a frente de trabajo, etc.

² Se le conoce como **frente de trabajo** a la delantera del túnel en el que se está trabajando actualmente. Análogo a un frente de avanzada, este se va desplazando a medida que progresan las labores.

1.1.1.4 *Tiempo perdido, no agrega valor (Trabajo no contributivo)*

Situaciones de **improductividad** generadas específicamente en una faena de producción. Se debe identificar la causa del tiempo perdido para su posterior análisis detallado.

En cada dato debe indicarse la posición del personal. En caso de tratarse de un traslado, debe indicarse la posición inicial y final. La plantilla estándar utilizada para la toma de datos se incluye en Anexos.

1.1.2 *Tiempos medios durante el turno*

Fue medido el tiempo de cada una de las actividades imprescindibles realizadas durante el turno. De esta forma fue posible estimar cuánto es el tiempo medio disponible para el trabajo efectivo durante el turno. Las horas potenciales de trabajo no consideran traslados fuera de la mina ni colación, sólo el tiempo en que efectivamente puede realizarse una labor productiva.

Descripción	Hora de inicio	Duración
Inicio jornada promedio	8:00	0:40
Casa de Cambio	8:40	0:45
Colón - Of. Jefe de Turno	9:25	0:42
Charla inicio jornada	10:07	3:48
Tiempo potencial de trabajo	13:55	0:15
Postura - Barrio Cívico	14:10	0:51
Colación	15:01	0:24
Barrio Cívico - Postura	15:25	2:42
Tiempo potencial de trabajo	18:07	0:42
Postura - Barrio Cívico	18:49	0:30
Barrio Cívico - Colón	19:19	0:15
Casa de Cambio	19:34	N/A

Figura 1-2: Tiempos medios de actividades principales³.

Horas de duración del turno	9:38
Horas potenciales de trabajo	6:30

Figura 1-3: Horas de trabajo del turno.

³ Tiempos medidos en Mina Esmeralda de Diciembre, 2012 a Febrero, 2013.

Luego, fue posible determinar qué porción de las horas del turno corresponden a cada uno de los niveles de actividad ya enunciados. Cada uno de los datos puntuales se encuentra categorizado, así posibilita el análisis de qué porción del tiempo del turno no corresponde a trabajo efectivo.

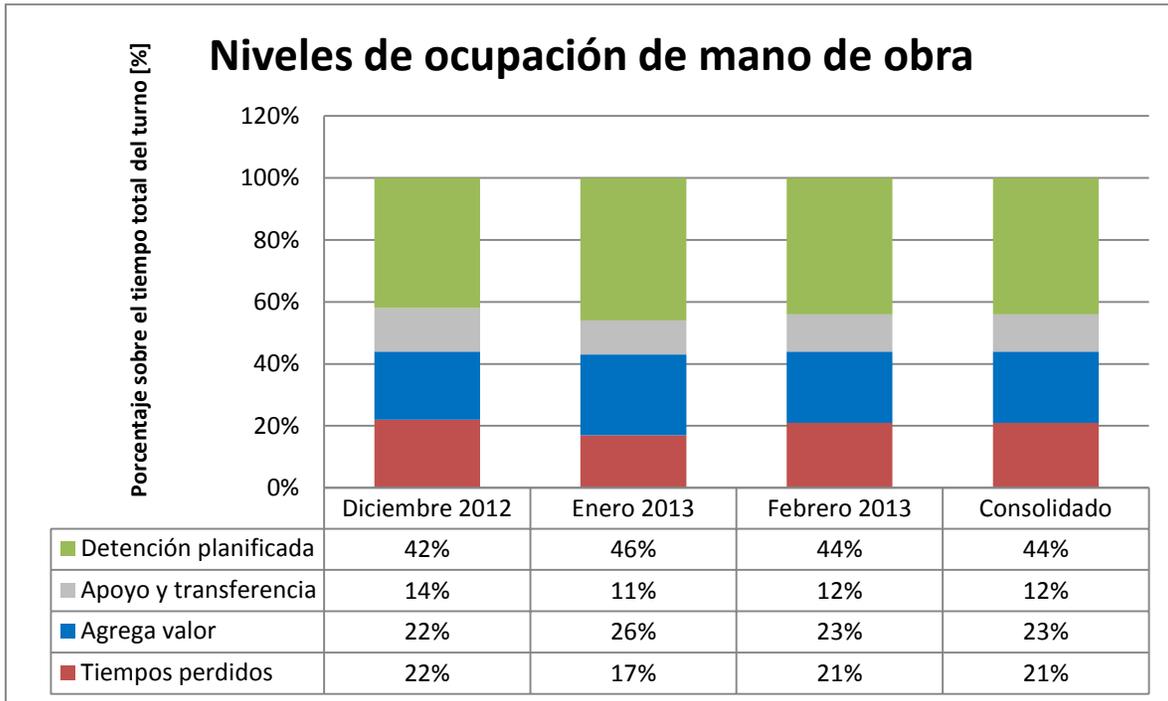


Figura 1-4: Niveles de ocupación de mano de obra sobre el total del turno.

Del gráfico se observa que alrededor del 21% del tiempo total del turno se está perdiendo. Sin embargo, este resultado está calculado sobre las horas del turno. Si es calculado sobre la jornada potencial de trabajo se aproxima al 36%.

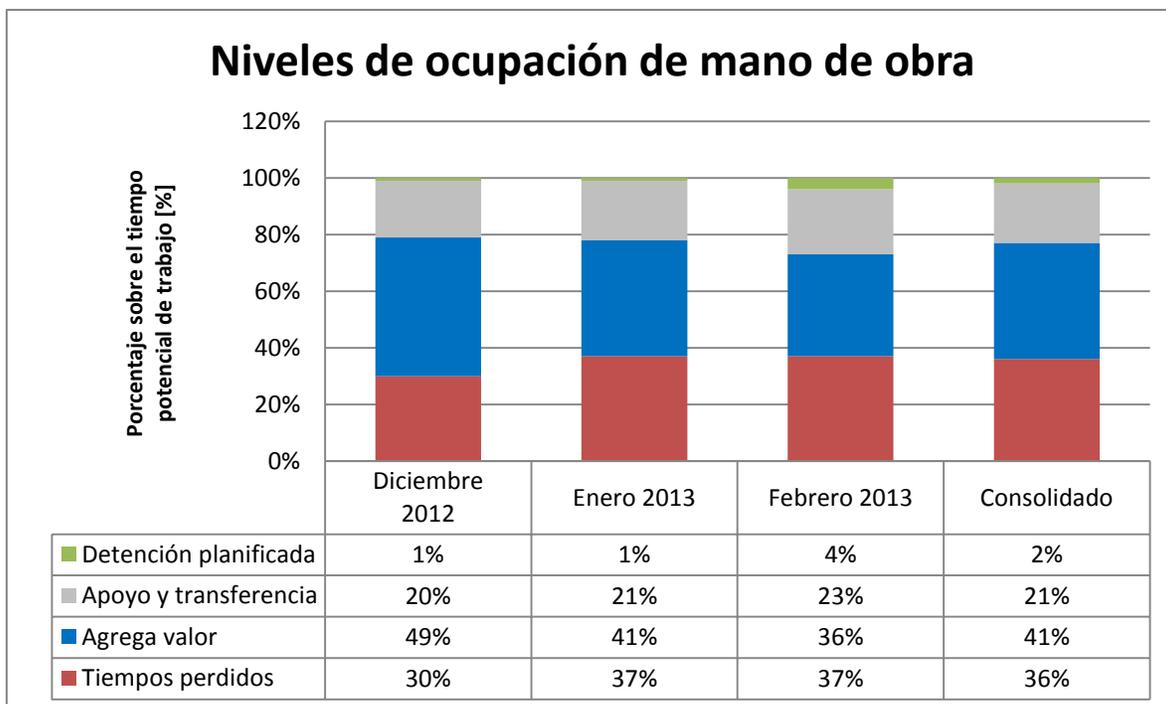


Figura 1-5: Niveles de ocupación de mano de obra sobre la jornada potencial.

Este resultado nos indica que, en el momento que fue realizado el levantamiento, se perdía aproximadamente el 36% del tiempo en que podían realizarse labores productivas. Es decir, más de 1/3 del turno estaba siendo desperdiciado por diversos motivos. En el siguiente gráfico se enuncian las principales causas de tiempo perdido:

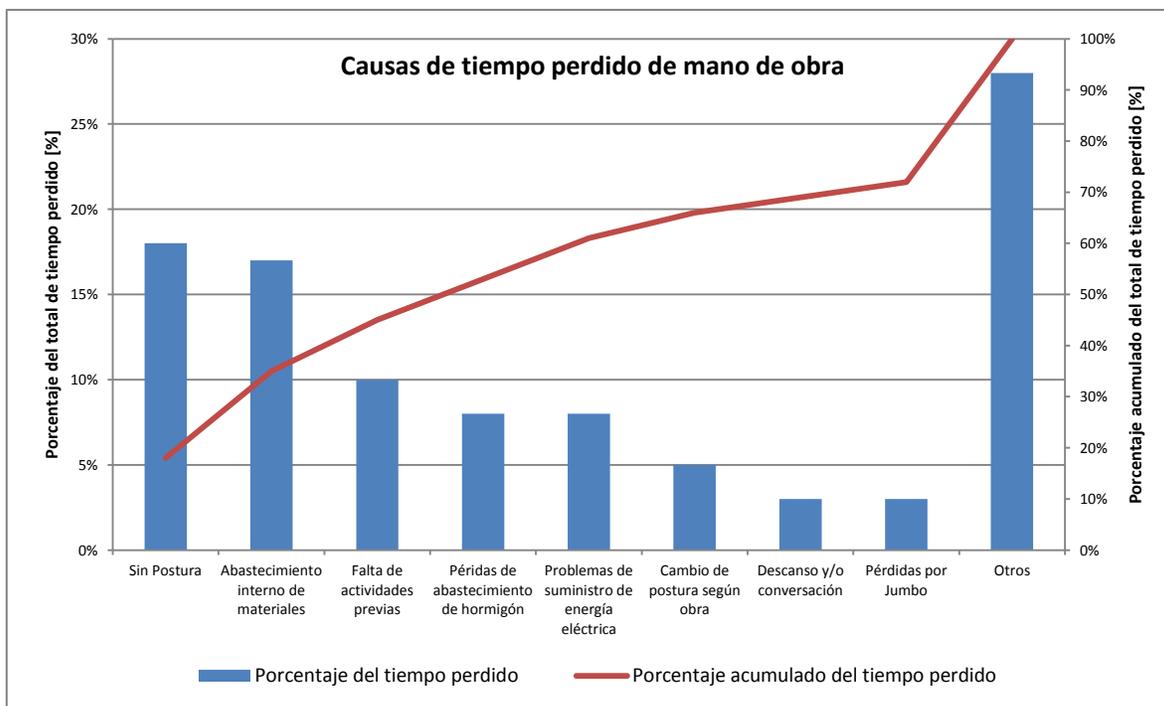


Figura 1-6: Gráfico de causas de tiempo perdido, jornada potencial.⁴

Las principales causas de tiempo perdido no tienen relación directa asociada a una detención de los trabajadores como se acostumbra a pensar. Es más, la mayor parte de las causas tienen relación directa con problemas de gestión y manejo de recursos. Específicamente relacionadas con problemas de coordinación y asignación de equipos y cuadrillas de personal. Parte de la labor que desempeña el Jefe de Turno.

Luego, las causas de pérdida más importantes son:

- Sin postura: No se le ha asignado ninguna labor al equipo, operador, ni a la cuadrilla de trabajadores que le acompañan.
- Falta de actividades previas: La cuadrilla de trabajadores se presenta en la frente, pero esta no se encuentra en las condiciones esperadas, sino que requiere de la realización de otras labores previas antes de comenzar con el trabajo en cuestión.
- Pérdidas por abastecimiento de hormigón: El camión mixer no se ha presentado en la postura para la descarga de hormigón. Ya sea por incapacidad de la planta o por mala coordinación.

⁴ El ítem Otros agrupa otras 25 causas de tiempo perdido, entre las que se encuentran: Espera por escolta, detenciones por ITO, abastecimiento externo de materiales, problemas de suministro de agua, esperas por tronaduras, pérdidas por equipos, acopios inadecuados, etc. Ninguna de las cuales supera el 3% individualmente.

- Problemas de suministro de energía eléctrica: No se ha coordinado la instalación de servicios en la frente para que aquellos equipos dependientes del suministro eléctrico puedan trabajar.
- Cambio de postura según obra: Se modifica una orden ya emitida hacia una cuadrilla de trabajadores, remitiéndola hacia otra posición, con todo el tiempo perdido que dicho cambio implica.

Estas causas, que tienen relación directa con problemas de gestión, suman cerca del 50% del tiempo perdido.

De este análisis se infiere que existen problemas de organización relativos a la labor que desempeña el Jefe de Turno. Esta problemática ya ha sido relevada dentro de los actuales lineamientos de la empresa para los años venideros, específicamente en la gestión turno a turno de la planificación a corto plazo.

Es posible comenzar a generar la asignación de cuadrillas y equipos utilizando una herramienta computacional, que sirva de apoyo al trabajo del jefe de turno. Permitiendo así que este base sus decisiones en un análisis objetivo que abarque un horizonte temporal mayor.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar un algoritmo de asignación de cuadrillas y equipos a las frentes de trabajo que minimice las pérdidas operacionales del turno.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar una herramienta de apoyo para la gestión del turno.
- Identificar y analizar patrones de trabajos actuales.
- Identificar causas principales de las pérdidas operacionales.
- Programar de una herramienta que permita el uso del algoritmo desarrollado.

1.3 Alcances

- El trabajo no cuenta con ningún software base ni lenguaje de programación en específico, la elección es parte del diseño.
- Los datos utilizados fueron datos reales que se registraron en la Mina Esmeralda, y que alimentaron el modelo.
- Los objetivos diarios fueron definidos por la supervisión en conjunto con el mandante, siendo la base sobre la cual trabaja la herramienta.
- Los resultados generados tienen un fin último operacional, siendo dependientes de la planificación, y no un sustituto de esta.
- Sólo se trabajó sobre las operaciones unitarias del ciclo de avance en minería, no considerando las operaciones no secuenciales relacionadas a obras civiles.

2. ANTECEDENTES

2.1 Antecedentes generales

2.1.1 Descripción de la faena

La mina El Teniente (perteneciente a Codelco, División El Teniente), es una mina de cobre chilena, ubicada en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Se localiza aproximadamente a 120 kilómetros al sur de Santiago, a 50 kilómetros al este de la ciudad de Rancagua y a 2.300 msnm. Siendo operada Codelco, empresa autónoma propiedad del Estado chileno.

Inicialmente la explotación del mineral se realizaba por medio de Shrinkage Stopping y Pillar Caving, incluso en algunos sectores como Fortuna (sobre la cota 3269 msnm.) se explotó utilizando Open Stopes. Posteriormente se incorporó el Block Caving con traspaso manual en la década de los años cuarenta.

Al iniciarse la explotación en roca primaria, de mayor dureza, menor cantidad de fracturas y rellenos más duros, se desarrolló el método de explotación Panel Caving, cuyas principales características son la extracción mecanizada con equipos LHD (Load Haul Dump, conocidos como scoop o simplemente palas) y una malla de extracción diferente, compuesta por calles y zanjas.

Este método comenzó a aplicarse en 1982 en el sector Teniente 4 Sur y es el utilizado en la actualidad, con algunas variantes, en todas las unidades productivas de la mina.

El Teniente se compone de casi 2.400 km de galerías subterráneas, y su capacidad de producción la ha convertido en la mina subterránea más grande del mundo.

La mina Esmeralda corresponde a una de las principales minas comprendidas al interior de la División El Teniente, siendo uno de los últimos sectores en ser explotados antes de dar comienzo al proyecto del Nuevo Nivel Mina, y abandonar de forma definitiva los niveles superiores.

Actualmente el contrato de preparación minera de la empresa contratista incluye más de 30 kilómetros de túneles, sin considerar el trabajo que esta empresa ha desarrollado en El Teniente desde junio de 2007. Abarcando tanto el nivel de producción como el nivel de hundimiento, donde se realizan desarrollos horizontales, fortificación, construcción de obras civiles, piques de traspaso, chimeneas de ventilación, etc.

La faena cuenta además con una planta de hormigón al interior del nivel. Dicha planta es propiedad de la empresa contratista y permite sortear la necesidad de salir del complejo hasta la planta de Melón para poder llenar los camiones mixer, acortando el tiempo de viaje al momento de cargar hormigón o shotcrete.

2.1.2 Distribución de labores

La empresa que es contratada por el mandante, “contratista” en adelante, se encarga de ejecutar una labor particular. Estos trabajos pueden representar la totalidad de la obra, o bien partes de ella, divididas de acuerdo con su especialidad, territorialidad, horario, u otras causas.

El contratista, en este caso, es responsable de proporcionar todos los materiales, equipo (vehículos y herramientas) y la mano de obra necesarios para la construcción del proyecto. La distribución de labores al interior mina se rige según el siguiente esquema.

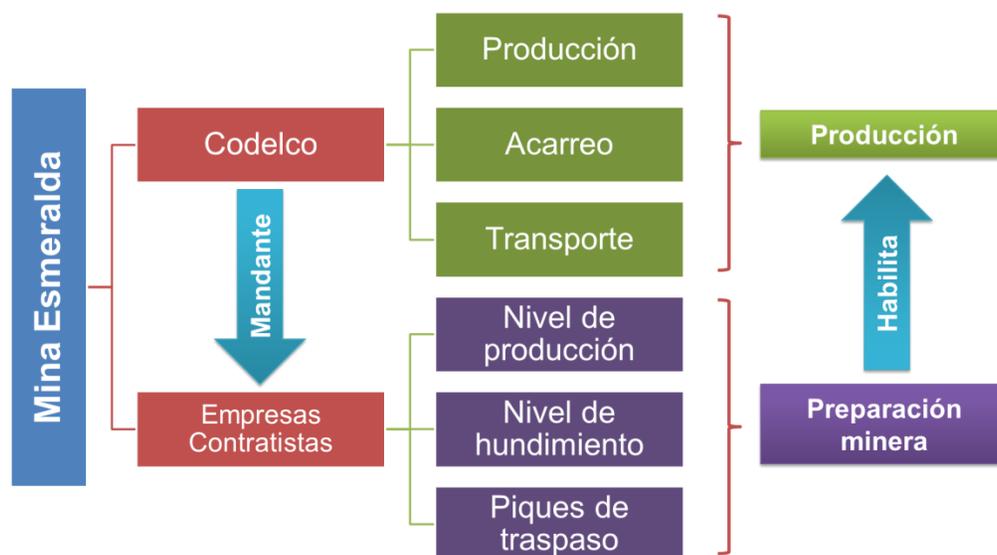


Figura 2-1: Esquema de la distribución de labores en la Mina Esmeralda

Básicamente, Codelco es quien se encarga de la producción o explotación del nivel una vez que la preparación minera está terminada.

Es común que el contratista se apoye en otras personas u organizaciones para que realicen determinado tipo de trabajos especializados. Entre dichas organizaciones se encuentra una de las áreas de la empresa, el Sistema Integrado de Gestión, encargado del desarrollo de nuevos proyectos de ingeniería y control de gestión.

La principal distinción entre un contratista y un subcontratista no radica específicamente en su capacidad, experiencia o especialización, sino que hace referencia especialmente al tipo de relación que lleva con el cliente final. En este caso, el SIG de la empresa, tiene relación directa con el contrato de Esmeralda, pero no con el mandante.

2.1.3 Método de explotación

El Block Caving y Panel Caving corresponden a métodos de explotación por hundimiento gravitacional masivo. Son métodos de bajo costo y alta productividad, lo que los hace económicamente atractivos. En Esmeralda se utiliza el método Panel Caving.

El Block Caving se adapta a minerales de fragmentación fina a media (scrapers o gravitacional) y de menor dureza, mientras que el Panel Caving nació por la necesidad de manejar una fragmentación de mayor tamaño y la aparición de una roca de mayor dureza. Esto significó incorporar la mecanización en las operaciones unitarias con la introducción de equipos LHD, martillos picadores, niveles de re-acarreo (trenes, camiones o correas). Además se aumentó el tamaño de las excavaciones y de la malla de extracción (distancia entre calles y zanjas de producción).

En el método de extracción por Panel Caving el yacimiento se prepara, socava y extrae progresivamente en “tajadas” (paneles paralelos). Tiene un frente de explotación “dinámico”.

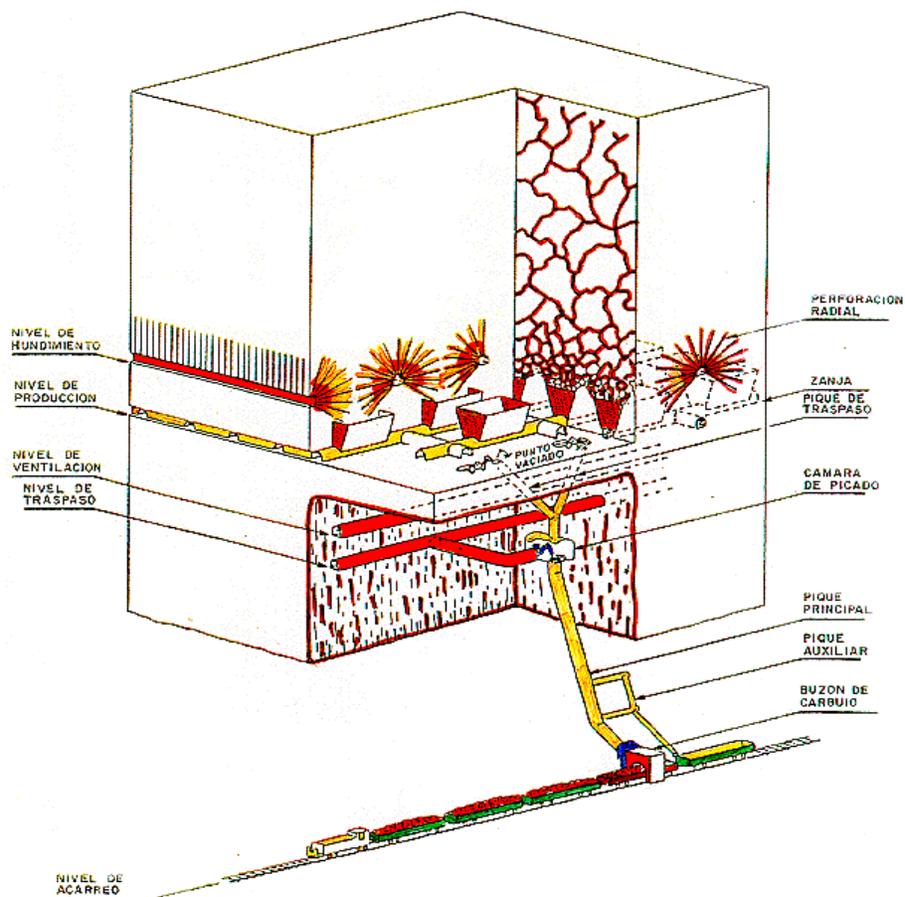


Figura 2-2: Vargas, M. 2012. “Método PC actual”. Curso Diseño Minero. Universidad de Chile.

Debido a la fuerza ejercida sobre el macizo rocoso, se crea una zona de altos esfuerzos entre la zona de pre-minería (donde se encuentra la empresa contratista) y la zona de relajación (donde se encuentra Codelco). Dicha zona es potencialmente riesgosa, pues la inestabilidad local puede llevar al colapso de puntos de extracción, zanjas, o calles completas.

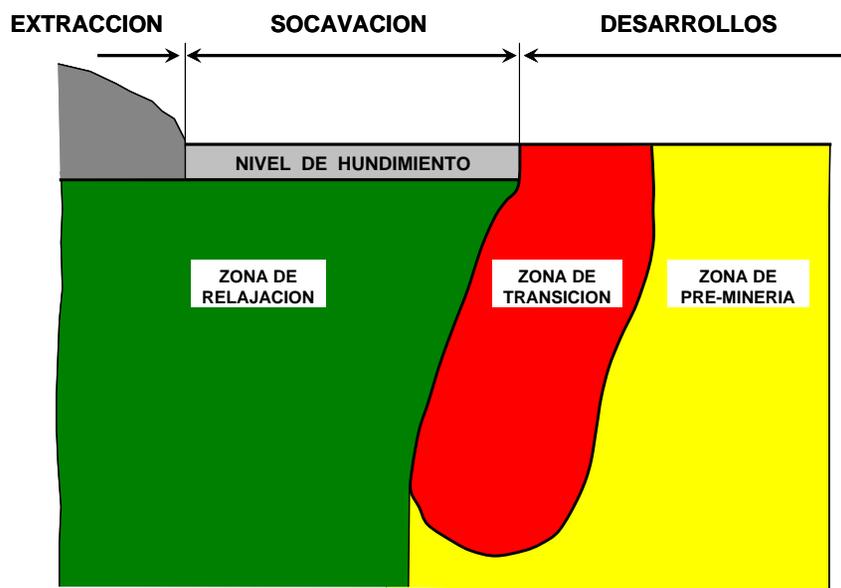


Figura 2-3: Vargas, M. 2012. “Zonas en PC”. Curso Diseño Minero. Universidad de Chile.

Respecto al secuenciamiento del nivel, como medida de control se optó en un comienzo por practicar distintas secuencias de desarrollo para mejorar algunas de las dificultades que presentaba el método de explotación. En el sector Esmeralda se utiliza la variante denominada “Hundimiento Previo” (Pre-Undercut) donde la secuencia es: Socavación del Nivel de Hundimiento → Desarrollo y Construcción de las Galerías del Nivel de Producción → Extracción del Mineral.

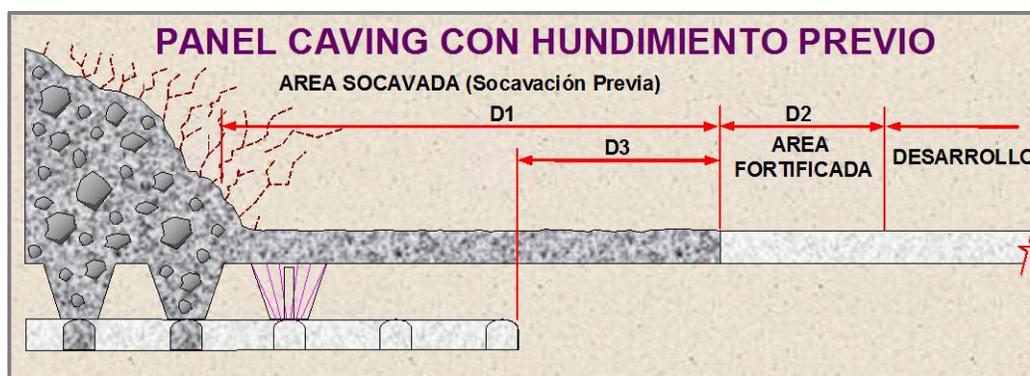


Figura 2-4: Vargas, M. 2012. “PC con hundimiento previo”. Curso Diseño Minero. Universidad de Chile.

Donde:

- D1: Distancia horizontal desde el área fortificada al área socavada.
- D2: Distancia horizontal del área fortificada.
- D3: Distancia horizontal desde el área fortificada al frente de desarrollo horizontal en el nivel de producción.

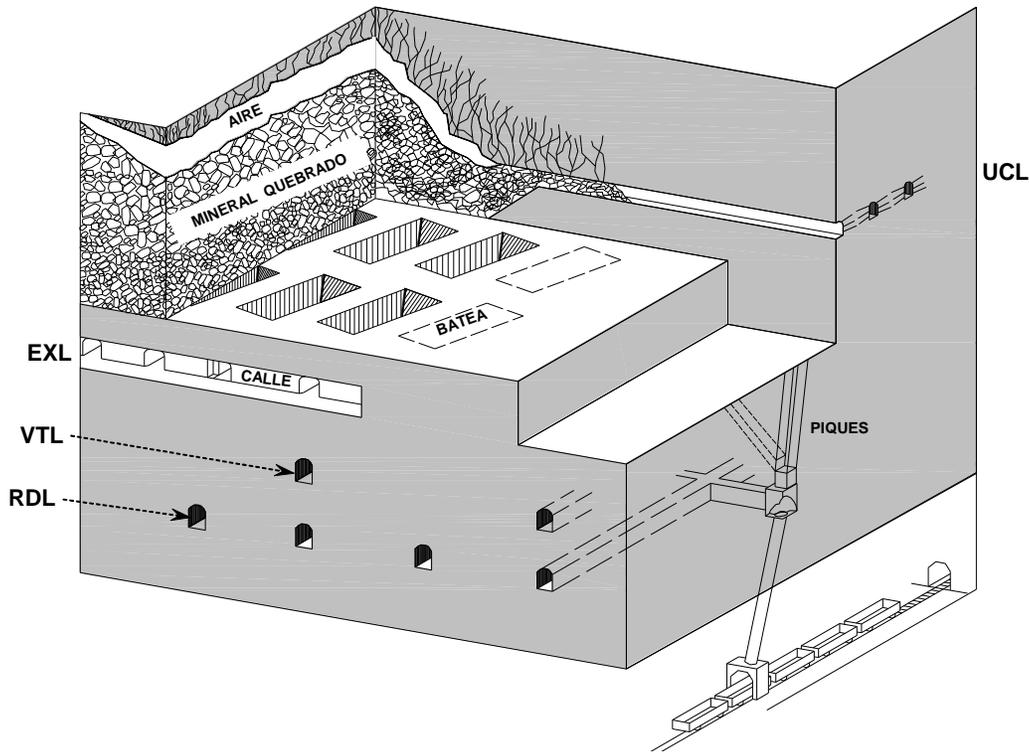


Figura 2-5: Vargas, M. 2012. "PC con hundimiento previo". Curso Diseño Minero. Universidad de Chile.

Donde:

- UCL: Nivel de hundimiento (Undercut Level).
- EXL: Nivel de extracción (Extraction Level).
- VTL: Nivel de ventilación (Ventilation Level).
- RDL: Nivel de reducción (Reduction Level).

El trabajo de Cavieres (1999) presenta una mejor descripción de las distintas variantes de métodos de explotación utilizados a lo largo de la vida de la División.

En virtud de lo anterior, se aprecia que este tipo de métodos de explotación requieren una gran inversión en infraestructura antes de comenzar la extracción del cuerpo

mineralizado. En este caso en particular, la empresa contratista sólo se encarga de la preparación minera entregando los puntos de extracción listos para que Codelco pueda empezar a recuperar el mineral.

Las principales obras comprendidas en esta propuesta son:

1. Desarrollos horizontales
2. Desarrollos verticales
3. Construcción de estaciones de vaciado
4. Construcción de puntos de extracción
5. Construcción carpetas de rodado
6. Construcción de muros.

Estas obras se realizarán en los niveles de Hundimiento y Producción de la Mina Esmeralda, incluyendo principalmente obras mineras y civiles.

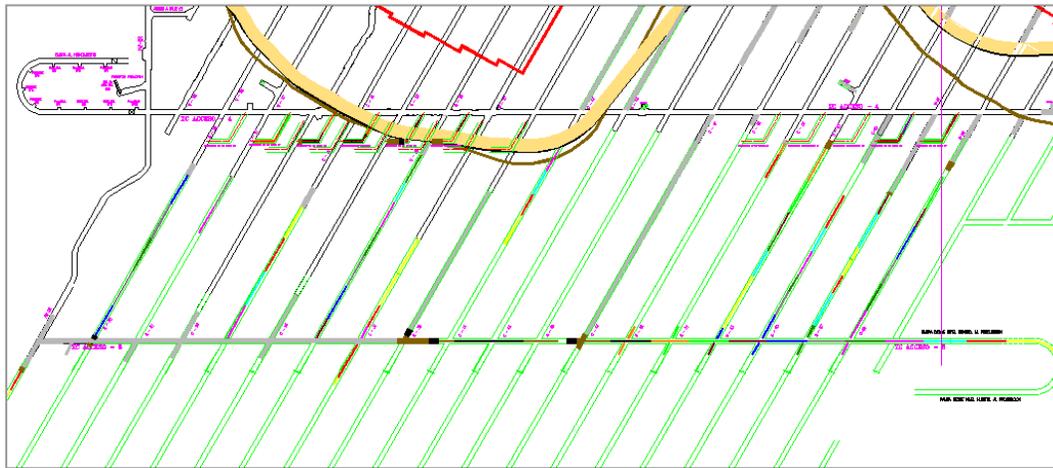


Figura 2-6: Plano de la empresa. 2013. Mina Esmeralda - Layout del Nivel de Hundimiento.

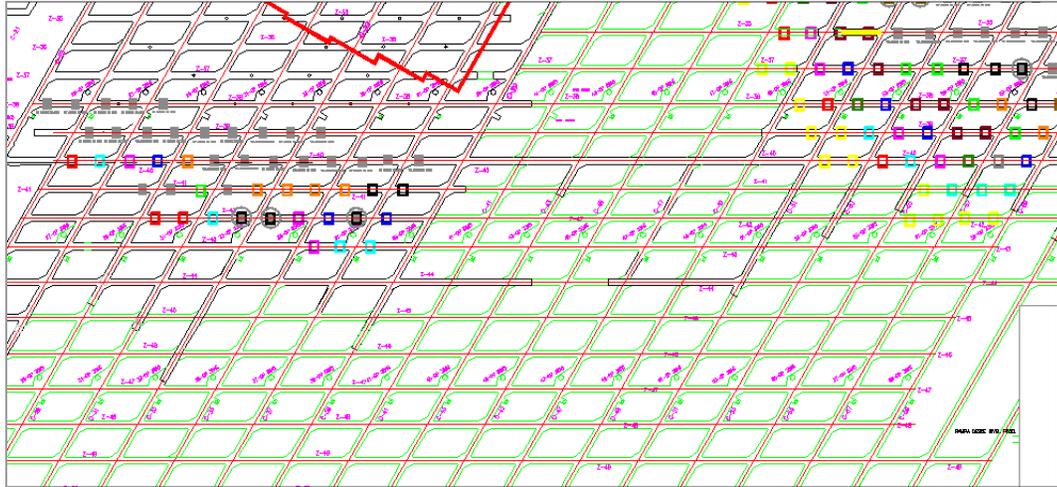


Figura 2-7: Plano de la empresa. 2013. Mina Esmeralda - Layout del Nivel de Producción.

2.1.4 Configuración espacial de niveles

De acuerdo Chacón (1976), “La malla de extracción, o malla de tiraje, es la disposición geométrica de los puntos por donde se extrae el mineral en el nivel de producción, una vez alcanzada la etapa productiva en un sistema por Block Caving” (p. 416).

La malla de extracción de la mina Esmeralda es una malla Teniente típica: un diseño propuesto por El Teniente, distinta a la tradicional configuración en “espina de pescado” utilizado en otras minas para el nivel de producción. Se caracteriza por una disposición regular de “calles” y “zanjas”.

Es un diseño simple que se rige sólo por dos direcciones para la disposición de galerías y permite obviar el cruzado de acceso, al usarse las mismas calles como puntos de acceso. Las dimensiones dependen fuertemente de los equipos a utilizar durante la producción. En este caso, las dimensiones son de 21.25[m] × 34.64[m] en los sectores más nuevos y en que se trabaja actualmente.

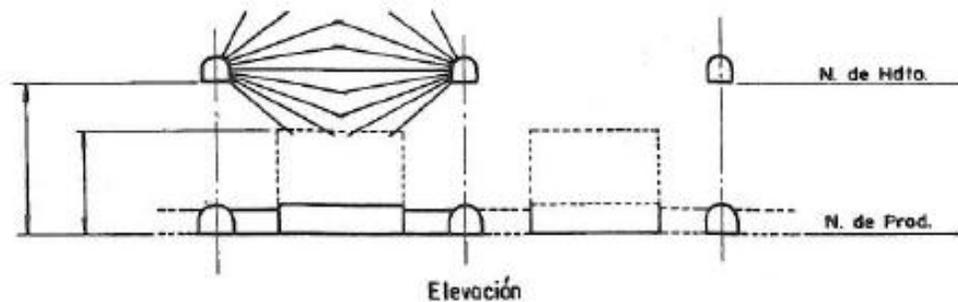


Figura 2-8: Chacón. 1976. “Malla de extracción tipo Teniente”. Vista en perfil.

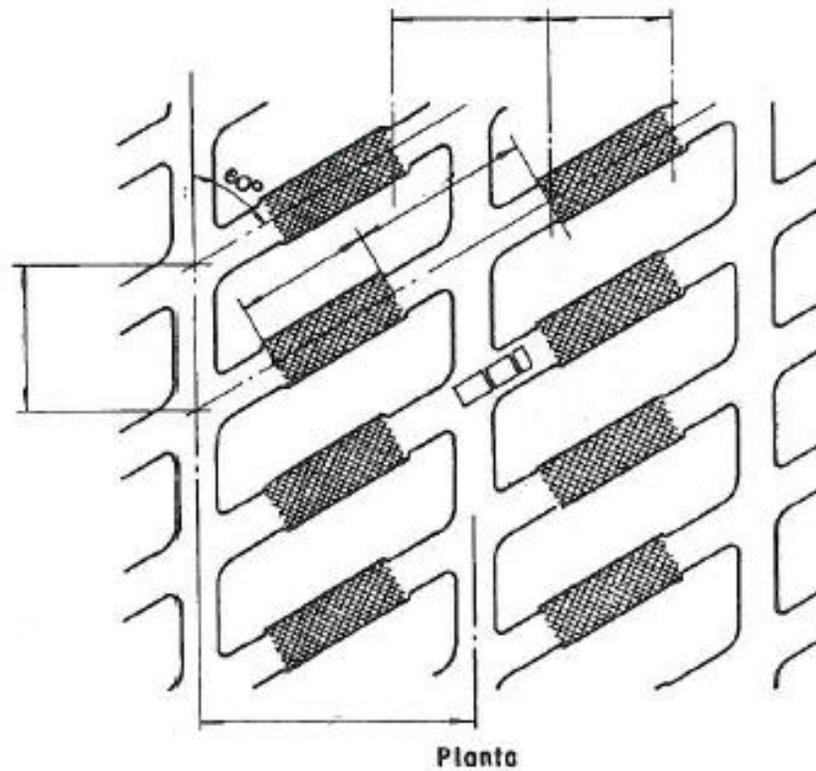


Figura 2-9: Chacón. 1976. “Malla de extracción tipo Teniente”. Vista en planta.

Dada la malla de tiraje, al interior de la mina se utiliza un sistema de coordenadas propio de la División El Teniente. Más que con un fin práctico, es resultado de la evolución cultural de la zona. En este esquema, un cruzado de producción tiene las siguientes características:

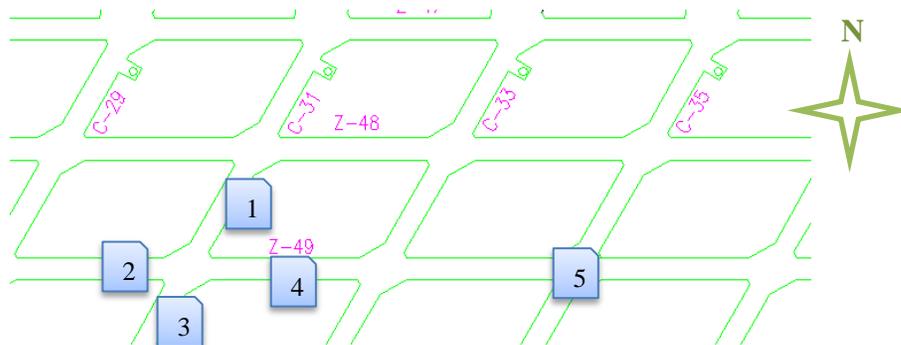


Figura 2-10: Configuración de la malla de extracción

Como puntos cardinales se mantienen tanto el norte como el sur con su orientación habitual, pero el este es reemplazado por “patilla” o FW (Foot Wall), mientras que el oeste por “cabeza” o HW (Hanging Wall).

A modo de ejemplo, los puntos 1, 2, 3,4 y 5, indicados en la figura, serían llamados de la siguiente forma utilizando la notación de la división:

- Calle 31 al norte de la zanja 49, o calle 31 al sur de la zanja 48.
- Zanja 49 al cabeza de la calle 31, o zanja 49 al patilla de la calle 29.
- Calle 31 al sur de la zanja 49.
- Zanja 49 al cabeza de la calle 33, o zanja 49 al patilla de la calle 31.
- Calle 35 con la zanja 49.

Es habitual omitir los conectores y conjunciones al dar las ubicaciones, o cambiar el orden en que se enumeran. Por otro lado, para el nivel de hundimiento la configuración es similar, pero no cuenta con zanjas entre las calles, reemplazadas por “accesos” espaciados a distancias mucho mayores.

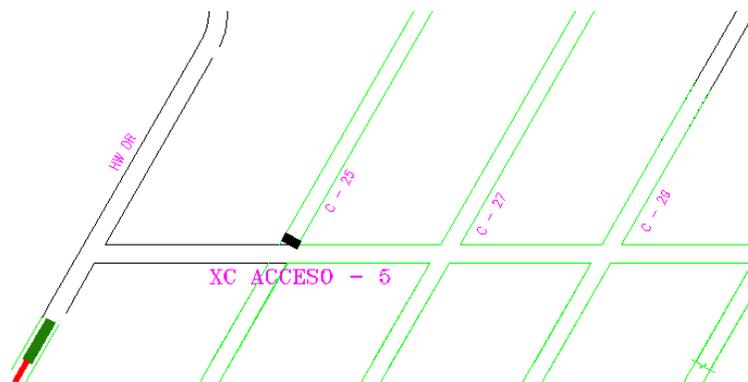


Figura 2-11: Configuración del nivel de hundimiento

2.1.5 Ciclo de avance en galerías

Debido a aspectos litológicos y geomecánicos de la roca existente en la Mina Esmeralda, y considerando un alto estándar de control de riesgo en la actividad de excavación, el contratista debe considerar el avance de desarrollo con fortificación definitiva a la frente (con perno, malla, y shotcrete), además de la fortificación complementaria de la frente propiamente tal con Split Set, la cual se debe realizar previo a cada ciclo de perforación para la instalación perimetral del pernos.

Según Castro (2011), el ciclo de minería subterránea comprende las siguientes ocho etapas:

1. Entrada a frente de trabajo.
 - Verificar si la ventilación ha removido los gases de tronadura.
 - Suprimir el polvo en suspensión.
 - Inspeccionar caja y techo
2. Instalar soporte inicial.
 - Remover material suelto.
 - Instalar soporte temporal.
3. Carguío de material fragmentado en unidad de acopio.
 - Directamente a unidad de transporte.
4. Transporte de material.
 - En unidad de acopio (ej. LHD, Camión, transferencia gravitacional).
 - En unidad de transporte (ej. camión, tren, correa transportadora, cañería).
5. Instalar soporte permanente.
6. Extender servicios si es necesario.
 - Ventilación; energía (electricidad/ aire comprimido).
7. Perforación de tiros.
 - a. Marcar disparos; perforar.
8. Tronadura.
 - a. Cargar explosivos en tiros.
 - b. Conectar detonadores para lograr un orden y tiempo de salida de tiros.

El ciclo de avance utilizado para la construcción de galerías en Esmeralda es el comúnmente usado en toda la División. En este caso, se cuenta con varias etapas de fortificación comprendidas dentro la instalación de soporte permanente para brindar más seguridad al diseño, y el material suelto no es removido hasta que la frente de trabajo esté despejada para su acceso a modo de evitar accidentes.

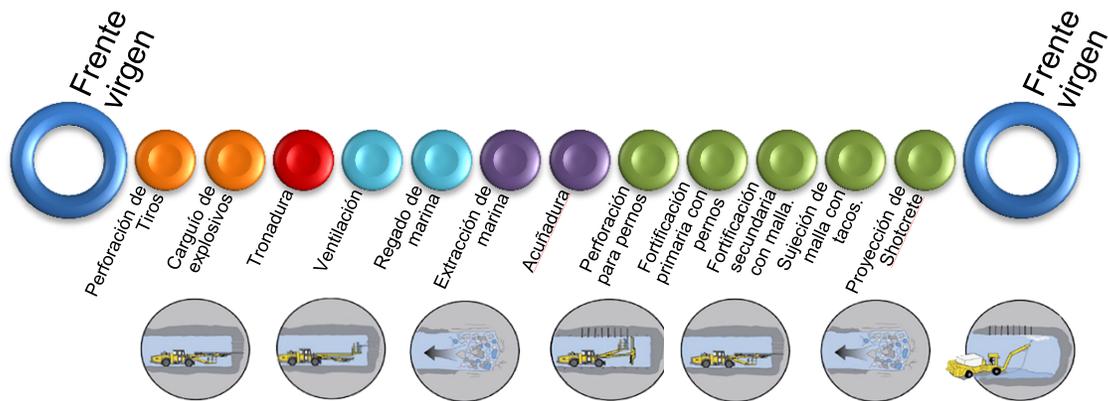


Figura 2-12: Ciclo de avance en desarrollos horizontales

Las distintas etapas del ciclo se detallan a continuación:

1. **Perforación de tiros de avance:** Usando una perforadora frontal “Jumbo” de dos brazos con sistema de perforación computarizado, se efectúan los tiros que alojarán los explosivos a detonar posteriormente. Los puntos en que se efectúan las perforaciones son los previamente marcados usando pintura, de acuerdo a la disposición indicada en el diagrama de disparo.
2. **Carguío de explosivos:** Personal competente y debidamente certificado se encarga de instalar las cargas explosivas al interior de las perforaciones realizadas por el Jumbo. Idealmente los explosivos deben ser instalados de acuerdo a como lo indica el diagrama de disparo, sin embargo, no es raro que la instalación se base simplemente en la experiencia del minero encargado.
3. **Tronadura:** Se despeja el área en un radio mínimo de 300 metros. Se bloquean todos los accesos que lleven hacia la zona donde se efectuará la tronadura, así como las zonas en que se tiene planificado ocurra el flujo de gases de tronadura para la ventilación.
4. **Ventilación de la frente tronada:** Una vez tronada la frente, se debe esperar hasta que la concentración de gases tóxicos alcance valores normales: 40 ppm para el CO, 1,6 ppm para el SO₂ y 25 ppm para el NO₂ según la Ley de Chile (2012). Una vez que el sector es seguro, se procede a quitar las cenefas en los accesos.
5. **Regado de marina:** Como medida adicional se rocía con agua la roca recién tronada, así se evita la emanación de gases atrapados entre los fragmentos al iniciar la remoción de la marina y a la posterior contaminación de los piques con gases de tronadura. Es fundamental contar con un indicador de la concentración de gases de tronadura durante este proceso.

6. **Extracción de marina:** El mineral fragmentado se carga utilizando un LHD y se transporta hasta un pique de vaciado de marina, donde el personal de Codelco se encarga posteriormente del acarreo. Dado el esponjamiento del mineral es imposible acceder al frente con otros equipos hasta que se efectúe esta etapa por completo. Se remueve marina partiendo por las zonas que más alejadas donde ha alcanzado la proyección de roca y se continúa hasta despejar la zona tronada para las siguientes etapas.
7. **Acuñadura:** Utilizando un acuñador de aluminio, se golpean las paredes del frente y roca caja con el fin de detectar posibles fragmentos de roca sueltos que puedan desprenderse y provocar algún tipo de accidente. Es importante destacar que ante cualquier avistamiento de un “planchón” suelto es necesario acuñar, sea cual sea la etapa que se esté llevando a cabo, pues no es tolerable priorizar alguna tarea antes que un trabajo seguro. Si la calidad de la tronadura es mala es muy probable que se desprendan grandes cantidades de roca, impidiendo una continuidad en el trabajo sin antes efectuar una segunda remoción de marina o limpieza.
8. **Perforación de paredes y techo de la frente:** Una vez acuñada la frente, un Jumbo se dispone a instalar los pernos del tipo “Split Set”. El perno Split Set se utiliza principalmente como soporte temporal en excavaciones subterráneas. Está diseñado para ser usado en macizos rocosos competentes. Es un sistema que provee de refuerzo inmediato, capaz de moverse con la deformación del macizo rocoso (Vallejos, 2011). Una vez fortificada la frente se procede a perforar las paredes y el techo con una herramienta de 38 milímetros de diámetro. Son 14 perforaciones distribuidas de manera uniforme en el perímetro por cada metro de avance.
9. **Fortificación primaria con pernos:** Una vez terminadas las perforaciones en la roca de caja y techo se procede a instalar pernos helicoidales usando una mezcla de cemento especial para su fijación, conocida como lechada, y la fijación de sus respectivas “planchuelas”, que cumplen una función análoga a una tuerca de gran diámetro.
10. **Fortificación secundaria con malla:** Una vez fijados los pernos helicoidales, mediante el fragüe de la lechada, se hace una instalación de malla tipo gallinero por encima de estos. Las planchuelas son removidas, luego se extiende la malla por sobre la superficie a fortificar, y finalmente se vuelven a colocar las planchuelas en su posición original, pero esta vez presionando la malla contra la roca.
11. **Sujeción de malla con tacos:** Una última etapa se realiza antes de la proyección de shotcrete. Es necesario que la malla esté aceptablemente adosada al cerro. Para ello

se lleva a cabo una etapa de perforación, usando un taladro percutor, e instalación de tacos con ojete. Este proceso se conoce comúnmente como “hilteo⁵ de malla”.



Figura 2-13: Perno de enganche

- 12. Proyección de Shotcrete:** La última etapa de fortificación, y la etapa final del ciclo de avance, requiere de un mixer que transportará la mezcla desde la planta hacia la frente, con el bolo en movimiento. La idea es proyectar la mezcla en capas de 3 a 4 cm cada vez, sobre las paredes y techo, utilizando un equipo conocido como Robotshot, donde mixer descargará el mortero. La mezcla proyectada es conocida como shotcrete, debido a su idoneidad a ser proyectada, para luego fraguar rápidamente gracias a los aditivos que contiene. La proyección se debe hacer en forma ascendente y en avance, rotando el brazo del equipo en pequeños círculos de trabajo y perpendicular a la superficie que se está proyectando, para evitar ondulación y rechazo del material. Luego se debe aplicar una segunda capa una vez que se inicie el fraguado de la capa anterior.

⁵ Acto de fijar la malla a la roca. Recibe este nombre debido a la marca del taladro percutor utilizado para hacer las perforaciones donde irán los pernos de enganche, Hilti.

2.2 Antecedentes específicos

2.2.1 *Despacho en minería a cielo abierto*

La minería subterránea comenzó mucho antes que la minería a cielo abierto (Russell, 2000), y originalmente no distaban mucho una de otra, pues se basaban en el mismo principio de arranque, carguío y transporte del mineral. Sin embargo esta última se masificó mucho más rápido durante la época de industrialización, acarreando consigo una serie de desarrollos tecnológicos enfocados a aumentar la productividad.

Entre estos desarrollos surgieron las grandes maquinarias para carguío y transporte, que hoy en día son el símbolo de la gran minería: Las palas y los camiones mineros.

2.2.1.1 *Necesidad de Sistemas de despacho*

El sistema pala/camión ha sido usado en minas a cielo abierto desde principios del siglo XX. Hace ya muchos años se considera como el sistema de acarreo más común en este tipo de minas (Lizotte, Bonates & Leclerc, 1987). Como hoy en día los rajos son extremadamente grandes y mecanizados, tienen una amplia variedad y cantidad de maquinaria para el movimiento de tierra. La utilización eficiente de palas y camiones es una tarea compleja y necesaria de optimizar. Cualquier pérdida de recursos implica un aumento sustancial en los costos, pues este tipo de operaciones constituyen alrededor del 50% del costo total de la operación minera (Ercelebi & Bascetin, 2009). Por lo tanto, un aumento en la eficiencia del sistema puede resultar en un ahorro y reducción del costo total de la mina.

2.2.1.2 *Estrategias de despacho*

De acuerdo a Alarie, Stéphane y Gamache (2002), existen dos principales enfoques al despacho de camiones: de una etapa (single-stage) y multi-etapa (multi-stage). En el enfoque single-stage, los camiones son despachados sin tomar en cuenta ninguna restricción o meta de producción, usualmente siguiendo alguna "regla de dedo". En el enfoque multi-stage, el problema de despacho es dividido en etapas, típicamente dos, donde la primera fija una meta de producción para cada pala usando programación lineal o no-lineal para la formulación del problema. La segunda etapa asigna camiones a palas siguiendo el plan definido en la etapa previa para reducir las desviaciones de la producción, usualmente mediante heurísticas que permitan computar el problema de forma más rápida, haciendo posible responder a la interrogante del despacho en tiempo real.

Estos autores también comentan que la literatura del despacho de camiones en la industria minera incluye tres tipos de estrategias usadas para asignar palas a camiones.

La primera estrategia, llamada 1-pala-para-n-camiones, es usada cuando el operador solicita un despacho y el sistema evalúa a cuál pala puede ser enviado de tal forma que se incurra en el menor costo o el mayor beneficio de acuerdo a ciertos criterios. Esta estrategia no considera el impacto de la decisión en las siguientes solicitudes de despacho.

Algunas de las heurísticas usadas por los sistemas de despacho, según Munirathinam y Yingling (1994), empleando el enfoque single-stage son:

- Asignación fija de camiones (FTA): los camiones son asignados a palas y puntos de vaciado de acuerdo a las variables de desempeño de la pala, los niveles de producción deseados y el tiempo esperado de demora para los camiones, manteniéndolos fijos en esta asignación. Esto considerando la aleatoriedad de falla de los equipos y la naturaleza estocástica del proceso de acarreo.
- Minimizar el tiempo de espera de camiones (MTWT): consiste en asignar un camión vacío a una pala, resultando en el menor tiempo de espera para el camión que está siendo despachado. Esto puede obtenerse minimizando la diferencia entre "shovel-ready-time" y "truck-ready-time". Este criterio apunta a mejorar el uso de camiones y palas y, por lo tanto, puede crear cortocircuitos entre palas cercanas, llevando al sub-servicio de las palas ubicadas más lejos de los puntos de vaciado.
- Maximizar los camiones: esto involucra asignar los camiones vacíos a una pala, donde espera ser cargada en el menor tiempo posible. Esto es logrado minimizando entre todas las palas, el máximo de dos cantidades: "truck-ready-time" para cargar el camión a ser cargado en la pala, y "shovel-ready-time" para cargar el camión a ser despachado. De acuerdo a los autores, esta estrategia tiende a reducir el tiempo inactivo de los camiones y las largas filas de espera, pero podría también llevar a una producción desbalanceada al incentivar el despacho de camiones a las palas más cercanas.
- Minimizar el tiempo de espera de las palas (MSWT): consiste en asignar un camión a la pala que ha esperado el mayor tiempo, o a la pala que espera estar disponible más pronto. El algoritmo hace esto maximizando la diferencia entre "truck-ready-time" y "shovel-ready-time", llevando a una utilización pareja de todas las palas. Sin embargo, también puede llevar a una disminución en la producción porque algunos camiones estarán sujetos a mayores tiempos de viaje, incluso cuando hay una pala inactiva ubicada más cerca.
- Maximizar la productividad momentánea de los camiones: consiste en tomar decisiones de despacho que maximicen la productividad temporal, dado un ratio

entre la capacidad del camión y su tiempo de ciclo en toneladas/minuto. Para valores menores de tiempos de ciclo, tenemos altos niveles de productividad momentánea, con el efecto deseado de aumento de camiones a palas cercanas. Un caso especial ocurre cuando la flota de acarreo es homogénea. En este caso, el problema se reduce a minimizar el tiempo de ciclo de los camiones.

- Minimizar la saturación de palas (MSC): esta estrategia despacha el camión a la pala que tiene el menor grado de saturación. Esto es, el ratio entre el número de camiones que han sido asignados y el número deseado de camiones que deberían haber sido asignados a la pala en cuestión, donde el número deseado es computado como el ratio entre el tiempo promedio de viaje para el camión desde el punto de despacho a la pala, y el tiempo promedio de carga de la pala para el camión. Esta estrategia intenta despachar camiones a palas a intervalos iguales de tiempo, consistente con la capacidad de carga de palas, tal que los camiones sean despachados a palas que están más lejos del número deseado.

La segunda estrategia descrita corresponde a m -camiones-para-1-pala, donde las decisiones toman en cuenta los m camiones que solicitarán despacho en el futuro cercano, pero considerando sólo una pala a la vez. Las palas son ordenadas de acuerdo a una medida que indica que tan retrasadas están en la producción. Tomar las palas en ese orden permite que la asignación reduzca esta medida.

Finalmente, se presenta la estrategia de m -camiones-para- n -palas, en que el algoritmo considera la asignación de los m camiones solicitando despacho en el futuro cercano, para las n palas, permitiendo una visión más global del sistema.

De acuerdo a los autores, esta última estrategia es resuelta formulando el problema como un “problema de asignación” o como un “problema de transporte”. La asignación define que cada pala puede recibir un único camión, y cada camión será despachado a lo más a una pala, donde $m > n$. La formulación de transporte, en cambio, asume que un grupo centros de provisión (los m camiones) con una dada capacidad, debe llevar unidades de un commodity en particular (en este caso, camiones) a otro grupo de centro de recepción (las n palas) que demandan ese commodity, al menor costo. En el contexto del despacho de camiones, cada centro de provisiones ofrece una unidad de un commodity, mientras que cada centro de recepción, demanda un número de unidades tal que el total demandado por todos los centros de recepción sea igual a m . Por la naturaleza combinatorial de este problema, los valores de m y n no pueden ser muy grandes, o no será computado en un tiempo razonable.

2.2.1.3 Tecnologías actuales

Las distintas metodologías han derivado en numerosos softwares destinados a la optimización y mejora de la producción, pues es bien sabido que el concepto de transporte tiene un gran impacto sobre los costos variables de una operación a cielo abierto, donde las distancias de traslado son de varios kilómetros. A estos desarrollos se suman los distintos algoritmos de asignación que se emplean para optimizar las ya conocidas leyes de envío a planta y botadero. Cada sector es bien categorizado y ello trasciende hacia el sistema de control, que de ser empleado eficazmente, puede derivar en un sistema robusto que permita alcanzar el mejor escenario posible, acorde a la planificación existente. Los flujos de información son constantes, permitiendo el cálculo de destinos a cada instante, menguando cualquier repercusión negativa que pueda tener un imprevisto.

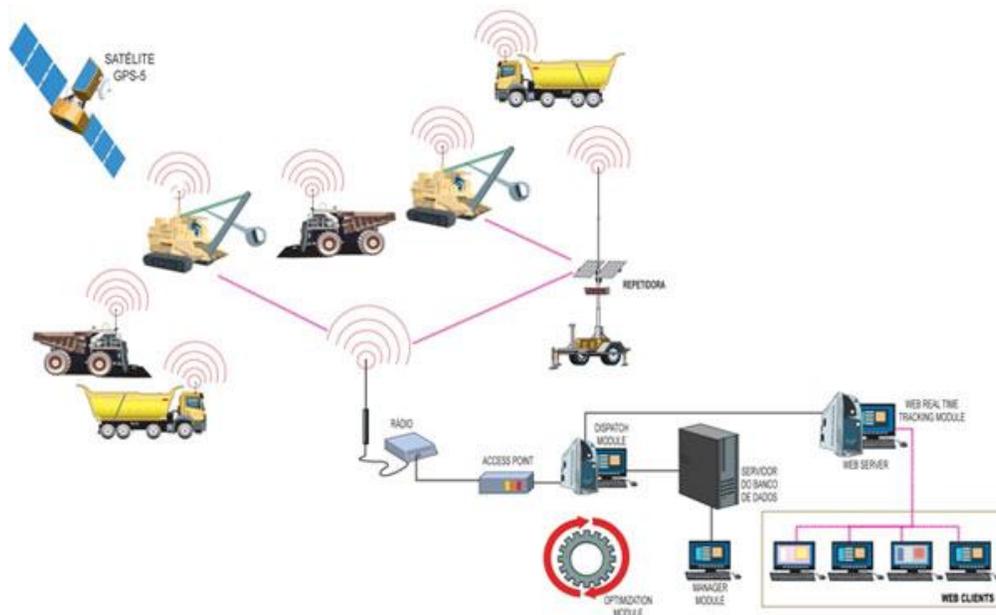


Figura 2-14: Hardware de la solución SmartMine®

Todos los equipos funcionales cuentan con Trackers, que son ordenadores en equipos tales como camiones, excavadoras, martillos neumáticos y las excavadoras, entregando una interfaz entre el operador del equipo y el operador de la maquinaria de la central de control. El Tracker obtiene su posición por GPS y almacena todos los eventos en el equipo antes de enviarlos a la estación de la red inalámbrica. Esto asegura que los datos no se pierden si se produce un problema en el centro como la falta de energía, por ejemplo. La mayoría de eventos se calculan de forma automática sin intervención del operador, eliminando errores durante esta acción.

De acuerdo a Subtil, Silva y Alves (2011), el algoritmo implementado por SmartMine®, tiene un enfoque multi-etapa y multicriterio, que usa programación lineal, simulación de eventos discretos y algunas heurísticas específicas para la asignación.

Funciona bajo dos fases principales: planificación de asignaciones y asignación dinámica.

En la primera fase encuentra la máxima capacidad de producción de la mina en el escenario actual, y el tamaño óptimo de la flota requerida para alcanzar esta producción. Esto se logra mediante un modelo robusto de programación lineal, que considera las restricciones de operación presentes en la operación actual y las necesidades específicas de la mina.

En la segunda fase, la asignación dinámica, el algoritmo encuentra el mejor programa de asignación para los requisitos de despacho a cumplir según la planificación de asignaciones, usando una heurística de despacho que utiliza simulación discreta y técnicas multicriterio de optimización.

2.2.2 Despacho en minería subterránea

El trabajo en minería subterránea tiene la particularidad de ser mucho más restrictivo en disponibilidad de información, a diferencia de la minería a cielo abierto, donde la posición de los equipos y el personal puede ser conocida en cada instante durante la operación gracias a las tecnologías actuales.

Al contrario de la operación en rajo, el trabajo en el subsuelo está condicionado por un ambiente de trabajo mucho más hostil, donde las condiciones de trabajo son con visibilidad prácticamente nula, además de la evidente incapacidad de incorporar nuevas tecnologías en sectores que aún carecen de infraestructura y energía eléctrica. En sectores nuevos la comunicación radial no funciona de inmediato, pues la roca intacta impide que la radio-propagación ocurra de la misma forma que en superficie, donde la atmósfera afecta muy poco a este tipo de onda electromagnética. De modo que se requiere de la forzosa instalación de puntos de transmisión para que el sistema de comunicación pueda funcionar eficazmente.

2.2.2.1 Tecnologías actuales

Con la automatización viene la posibilidad de la optimización, porque más información está disponible y las acciones pueden repetirse con mayor precisión (Saayman, 2006). La etapa de producción permite la incorporación de algún tipo de sistema de control, pues la regularidad en las rutas de traslado faculta la instalación de sensores que identifican el paso de la maquinaria a través posiciones específicas y relevantes para el ciclo productivo. Entre las variables de interés, se encuentran la cantidad de mineral, la desviación estándar de los niveles de mineral sobre puntos de extracción, la utilización de los equipos, alimentación al chancador, etc. Sin embargo, las estrategias existentes aún están siendo evaluadas, y los sistemas no son del todo confiables. Además, es sabido que si los objetivos son demasiados ambiciosos, el costo de implementar un sistema de despacho en minería subterránea puede ser demasiado alto (Saayman, 2006.), especialmente si se tiene en mente alcanzar un alto grado de autonomía en los equipos. Parte importante de la evaluación requiere el desarrollo de una plataforma de simulación relativamente económica para el testeo de los sistemas.

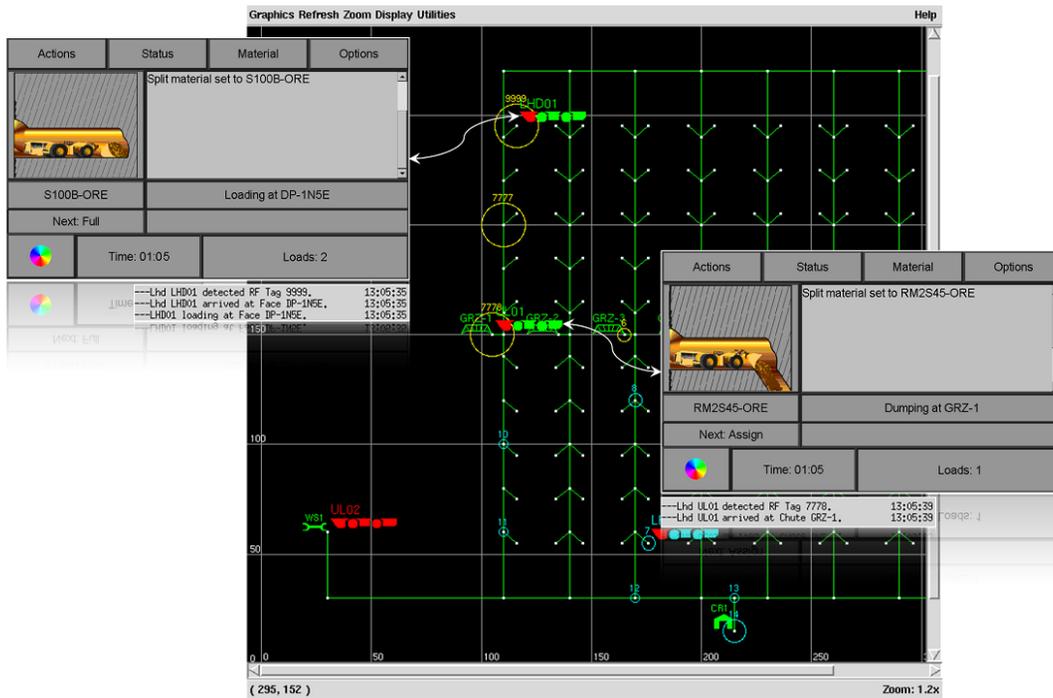


Figura 2-15: Interfaz DISPATCH® Underground mine management system

2.2.3 *Despacho en preparación minera subterránea*

La preparación minera subterránea no cuenta con ninguno de estos beneficios. Si bien existen grandes avances en tecnología para mejorar los niveles de productividad en las distintas etapas del ciclo de avance, ello no tiene una finalidad vinculada al control ni a la gestión de recursos. Más bien tiene un propósito relacionado con la seguridad y la eficiencia del proceso productivo.

Todo lo anterior afecta la gestión de recursos que realiza el Jefe de Turno al comienzo de la jornada. Generalmente la preparación minera tiene la característica de ser sustancialmente secuencial y es relativamente sencillo conjeturar el bosquejo que debe generar el Jefe de Turno para alcanzar un ritmo de trabajo relativamente eficiente. Sin embargo, el escenario es completamente distinto cuando se trabaja en más de un frente de avance.

Con los avances en la automatización minera, han surgido nuevos problemas. Uno de ellos es tener un punto de decisión central e inteligente, que controle los procesos de la mina. Una gran cantidad de información puede obtenerse con el aumento de estructuras sensoriales. Sin embargo, para una persona será difícil tomar en cuenta toda la información relevante al momento de tomar una decisión, incluso si tiene experiencia. Ello conlleva la necesidad de la existencia de un sistema computarizado central que pueda hacer uso de toda esa información para tomar decisiones más óptimas (Saayman, 2005).

Por otro lado, la diversidad de equipos tiene serias implicancias sobre el grado de dificultad del problema. A diferencia del ciclo de producción, cada etapa sólo puede ser realizada por un equipo específico y no puede realizarse una etapa antes que otra, añadiendo restricciones adicionales al sistema conforme avanza el ciclo.

2.2.4 *Patrones de trabajo actuales*

De acuerdo a lo previamente expuesto, resulta difícil extrapolar el funcionamiento de los sistemas de despacho actuales a la preparación minera. El principal punto de referencia corresponde a la metodología actual, que ha sido invariante durante años.

El Jefe de Turno, encargado de gestionar los recursos y asignar los distintos equipos a sus respectivas labores, trabaja bajo ciertos patrones recurrentes. Los supuestos que se da en gran parte se justifican en el alcance de su jurisdicción como Jefe de Turno dentro de la organización y la mina en general.

- El proceso de avance es secuencial y por etapas.
- Los equipos y cuadrillas siempre cumplen la misma función.
- Se asume disponibilidad inmediata e ilimitada de materiales.
- El personal no controlado está siempre disponible:
 - Instalación de Servicios.
 - Topografía.
 - Eléctricos.
 - Mecánicos.
 - ITO (Inspector).
 - Planta de hormigón.
 - Etc.
- No existen bloqueos en traslado por terceros no planificados.
- El horario de tronadura es dependiente del mandante y dichos horarios están definidos y son inamovibles.
- La ventilación se lleva a cabo entre cambios de turnos y se realiza el ingreso del personal luego del posterior chequeo de gases.

En base de lo anterior, la asignación de labores se realiza de forma manual, dando hasta 3 labores como máximo por turno para cada uno de los equipos de trabajo. El Jefe de Turno realiza mentalmente el trabajo de predecir el ciclo de avance en las distintas labores conforme pasan las horas del turno. La asignación de tareas se hace por medio de instrucciones escritas.

2.3 Programación Lineal

2.3.1 Descripción general

La programación lineal (LP u optimización lineal) es un método matemático para determinar la forma de alcanzar el mejor resultado posible (como máximo beneficio o costo mínimo) en un modelo matemático para una cierta lista de requerimientos representados como relaciones lineales. La programación lineal es un caso específico de optimización matemática (Vershik, 2001).

Más formalmente, la programación lineal es una técnica para la optimización de una función objetivo lineal, sujeto a restricciones lineales de igualdad o desigualdad. Su region factible es un poliedro convexo, el cual es definido como un conjunto finito de semiespacios, cada uno de los cuales es definido por una desigualdad lineal. Su función objetivo es una función afín de valor real definida en este poliedro. Un algoritmo de programación lineal encuentra un punto en el poliedro donde esta función tiene el menor (o mayor) valor, si dicho punto existe.

2.3.2 Representación del modelo

Los programas lineales son problemas que pueden ser expresados en una forma canónica:

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar } c^T x \\ &\text{Sujeto a } Ax \leq b \\ &\quad \text{y } x \geq 0 \end{aligned}$$

Donde x representa el vector de variables (a ser determinadas), c y b son vectores de coeficientes conocidos, A es una matriz conocida de coeficientes. La expresión a ser maximizada o minimizada es llamada la función objetivo ($c^T x$ en este caso). Las desigualdades $Ax \leq b$ son las restricciones que especifican el poliedro convexo sobre el que la función objetivo será optimizada. En este contexto, dos vectores son comparables cuando tienen las mismas dimensiones.

La programación lineal es usada en industrias que incluyen transporte, energía, telecomunicaciones, manufactura, etc. Ha probado ser útil en modelar diversos tipos de problemas de planificación, ruteo, agendamiento, asignación y diseño.

2.3.3 Herramientas existentes

Para resolver problemas de programación lineal existen algoritmos que fueron creados posterior mediados del siglo XIV, luego de que la programación lineal fue inventada. Entre los más populares se encuentran los algoritmos “Criss-cross”, “Conic sampling” y “Simplex”. Siendo este último el más popular y ampliamente usando, por ser el fácil de entender y asegurar el descubrimiento del óptimo en caso de existir, siempre que se tomen ciertas precauciones.

2.3.3.1 Lenguajes de programación

Para programación lineal puede ocuparse prácticamente cualquier lenguaje de programación que permita utilizar operaciones matemáticas básicas y comparaciones lógicas de números reales. Sin embargo, la programación de un algoritmo como Simplex, utilizando un lenguaje de bajo nivel, puede resultar engorroso y sustancialmente poco eficiente en el planteamiento del problema, especialmente cuando el número de variables y restricciones sea alto.

Luego de una revisión y priorización de los diversos lenguajes de programación existentes nos deriva a un conjunto de lenguajes de alto nivel conocidos como Lenguajes de Modelamiento Algebraico, o AML por sus siglas en inglés (Algebraic Modeling Language).

Estos lenguajes tienen la particularidad de utilizar una sintaxis muy parecida a la notación usada en la formulación de problemas de optimización, lo que permite describir y resolver problemas a gran escala y de alta complejidad. Esto facilita la definición de problemas en el dominio de la optimización. Sin embargo, y a pesar de plasmar el problema de forma concisa, este tipo de lenguaje no aporta indicios de cómo procesarlo.

Un AML no resuelve los problemas directamente. En vez de eso, llama un algoritmo externo para obtener una solución. Estos algoritmos son llamados “solvers”, y pueden manejar un cierto tipo de problemas como:

- Problemas lineales.
- Problemas de enteros.
- Problemas de entero-mixto.
- Problemas no lineales restringidos.
- Problemas estocásticos de optimización.
- Etc.

2.3.3.2 *Solvers para programación lineal*

Los solvers existentes para programación lineal (LP) difieren en muchos sentidos. Vienen con diferentes licencias y por supuesto, diferentes características, por ejemplo en términos de cómo son especificados los problemas. Los más populares se listan a continuación con sus principales características:

Solvers gratuitos y de código abierto

GLPK: GNU Linear Programming Kit es un software libre y de código abierto escrito en ANSI C que permite resolver problemas de entero-mixto y problemas de programación lineal.

LP_SOLVE: Es un solver de código abierto que puede ser usado para resolver problemas lineales y de entero-mixto escrito en ANSIC.

CLP: Escrito en C++, es un solver creado dentro del proyecto Coin-OR para atacar problemas de lineales de optimización. CLP es usado en muchos otros proyectos dentro de Coin-OR para construir otros algoritmos. Es de código abierto y está disponible como una librería o un solver independiente.

SCIP: Un framework⁶ para resolver problemas con enteros y restricciones, disponible en una librería de C o como un solver independiente. También soporta otros solvers de código abierto y comerciales. El framework puede ser usado sin restricciones para fines académicos, pero no para uso comercial.

SoPlex: Es un solver para programación lineal basado en el algoritmo Simplex, implementado en C++. Es posible incluirlo en otros programas usando una librería de clases en C++. Puede ser usado con fines académicos, pero para su uso comercial es necesario adquirir una licencia.

⁶ En el desarrollo de software, un **framework** o infraestructura digital, es una estructura conceptual y tecnológica de soporte definido, normalmente con artefactos o módulos de software concretos, que puede servir de base para la organización y desarrollo de software.

Solvers comerciales populares

Cplex: Solver comercial cuyo nombre completo es “The IBM ILOG CPLEX”. Es usado para resolver problemas lineales y de entero-mixto a gran escala. Es actualmente desarrollado por IBM.

Xpress: La suite de optimización de Xpress es un software comercial diseñado para resolver problemas lineales y de otra índole. Está disponible para diversas plataformas, así como en forma de librerías o una aplicación independiente.

Gurobi: “The Gurobi Optimizer” es un moderno solver para problemas de entero-mixto, así como otros problemas matemáticos de optimización. El optimizador Gurobi está escrito en C y está disponible para diversas plataformas.

2.3.3.3 Comparación de solvers

Una de las fuentes más informativas respecto a una comparación en el desempeño de diferentes solvers bajo distintos problemas, es el provisto por Mittelman (2011). En su trabajo realiza un benchmark de las distintas herramientas trabajando en una serie de problemas. Los resultados que presenta son los siguientes:

	tiempo de ejecución	instancias resueltas	% resuelto
CBC	10.20	41	47.13
CPLEX	1.45	73	83.91
GLPK	22.11	3	3.45
GUROBI	1.00	77	88.51
LP_SOLVE	19.40	5	5.75
SCIP-C	3.76	63	72.41
SCIP-L	6.40	52	59.77
SCIP-S	5.33	57	65.52
XPRESS	1.29	74	85.06

Tabla 2-1: Resultados de solvers aplicados a las distintas instancias del benchmark.

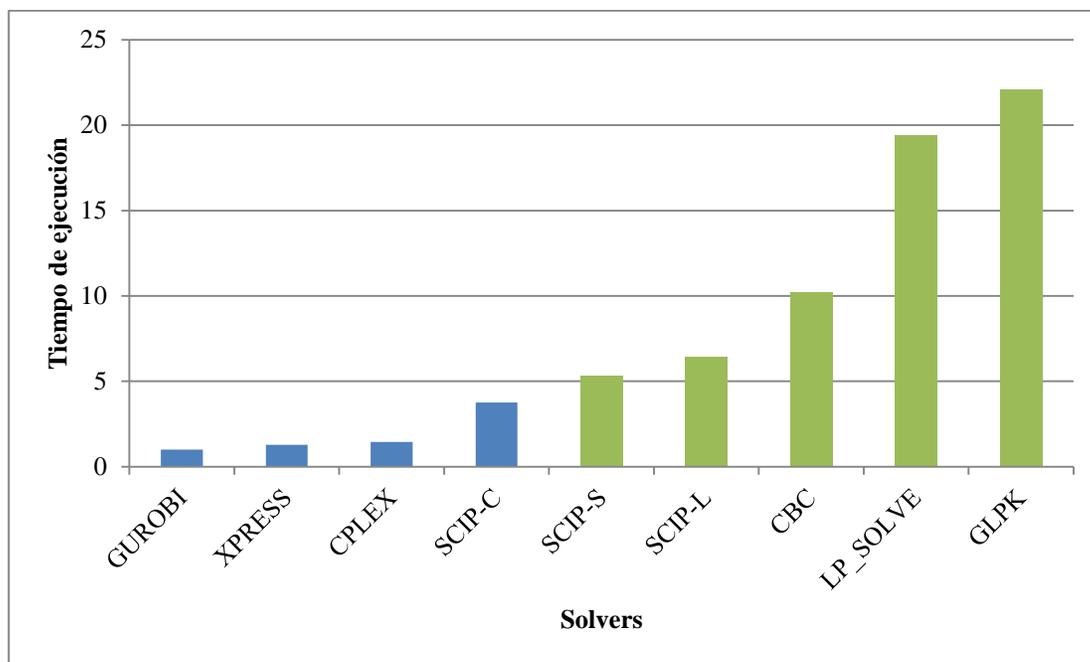


Tabla 2-2: Tiempos de corrida aplicados a los datos de prueba del benchmark.

Es claro que el software comercial (azul) tiene mejores resultados en comparación a las herramientas gratuitas y de código abierto (verde).

Un segundo estudio y más reciente, realizado por Meindl (2012), realiza un segundo benchmark con versiones más recientes de los solvers puestos a trabajar en una serie de problemas de 2 y 3 dimensiones. Los resultados presentados son los siguientes:

glpk	lpsolve	clp	gurobi	cplex
9.00	137.00	13.00	4.00	1.00

Tabla 2-3: Tiempo de corrida (escalado) para problemas bidimensionales

glpk	lpsolve	clp	gurobi	cplex
205.00	4,149.00	2,823.00	164.00	1.00

Tabla 2-4: Tiempo de corrida (escalado) para problemas tridimensionales

glpk	lpsolve	clp	gurobi	cplex
189.00	3,822.00	2,594.00	151.00	1.00

Tabla 2-5: Tiempo de corrida (escalado) para todos los problemas

Nuevamente, los resultados obtenidos resultan ser abrumadores para los software libres y de código abierto en relación a los software comerciales. Sin embargo, estos últimos pueden ser utilizados con tranquilidad para la resolución de problemas “pequeños”. Dentro de las alternativas gratuitas, este último estudio demuestra que GLPK es la alternativa más rápida para ambos tipos de problemas, siendo la alternativa elegida a utilizar finalmente.

2.3.4 *GNU Linear Programming Kit*

Es un paquete de software destinado a la resolución de problemas a gran escala. Es publicado bajo la licencia GNU GLP⁷. Tiene los siguientes componentes principales:

GLPK no es un programa (no puede ser llamado y no tiene función “main”). En vez de eso, el cliente alimenta la información del problema al algoritmo a través de la API⁸ de GLP y recibe los resultados de vuelta. Algunos de los algoritmos implementados en GLPK son Simplex, Branch and bound, método del punto interior primal-dual, y muchos otros.

Los problemas pueden ser modelados usando el lenguaje GNU MathProg, que comparte muchas partes de su sintaxis con AMPL⁹. Es más, GNU MathProg es un subset del lenguaje AMPL. El lenguaje se comunica con alguno de los algoritmos que incluye el paquete:

- Revised simplex method (for LPs).
- Primal-dual interior point method (for LPs).
- Branch-and-bound method (for IPs).
- Stand-alone LP/MIP solver glpsol.

Una de las ventajas de GLPK en comparación al resto del software libre, es su buena documentación. Dentro de la bibliografía existente, GLPK incluye en su última versión un manual del lenguaje: Modeling Language GNU MathProg Language Reference (Mayo, 2013). Además de uno referente a las rutinas de la herramienta en cuestión: GNU Linear Programming Kit Reference Manual (Mayo, 2013).

⁷ <https://gnu.org/licenses/gpl.html>

⁸ Interfaz de programación de aplicaciones (IPA) o API (del inglés Application Programming Interface) es el conjunto de funciones y procedimientos (o métodos, en la programación orientada a objetos) que ofrece cierta biblioteca para ser utilizado por otro software como una capa de abstracción. Son usadas generalmente en las bibliotecas.

⁹ AMPL es un acrónimo para "A Mathematical Programming Language", un lenguaje de modelamiento algebraico para describir problemas de alta complejidad.

3. METODOLOGÍA

En primer lugar deben definirse los parámetros de entrada que alimentarán el modelo a trabajar. Dicha información debe encontrarse disponible a inicios del turno, pues es necesaria para elaborar una gestión adecuada de los recursos. Una vez identificado el conjunto de datos a trabajar, se procede con el planteamiento del modelo.

La complejidad de la representación estará dada por el número de simplificaciones respecto a la realidad que esta considere. Como la resolución del problema debe tomar poco tiempo, para que el resultado sea aplicable a comienzos del turno, se opta por considerar un modelo genérico que no dependa del layout del proyecto. Es decir, obviando las distancias de viaje e incorporándolas dentro de los tiempos de ciclo como un promedio específico para cada actividad. Situación apropiada para un desarrollo como el trabajado en Esmeralda, donde las distancias de viaje de los equipos son cortas y poco variables en el tiempo.

Luego, la respuesta de cada modelo debe ser analizada respecto a un caso de estudio. De acuerdo a los resultados obtenidos se evaluará si el modelo es apropiado para la resolución de la problemática presentada, o es necesario incursionar en nuevas alternativas.

Una vez definido el modelo definitivo a trabajar, se procede a estudiar su respuesta con respecto al plan de corto plazo mediante simulaciones no determinísticas. Así puede dilucidarse si las condiciones bajo las que el Jefe de Turno debe realizar su gestión son realmente las más apropiadas para los fines de la empresa. Además de concluir respecto a la calidad de la asignación que éste realiza.

Finalmente, se analiza el desempeño de los modelos propuestos en escenarios distintos al caso de estudio. Para ello se generan escenarios con condiciones iniciales aleatorias, a fin de detectar si los resultados obtenidos sólo obedecen a un único escenario o no muestran un sesgo apreciable.

4. DESARROLLO

4.1 Formulación del modelo

4.1.1 Parámetros de entrada

La creación de un modelo requiere de fuentes confiables de información para que su funcionamiento sea apropiado. Gran parte de la planificación a largo plazo está pre-establecida por el mandante y sufre pocas modificaciones a lo largo de la ejecución del proyecto. Tanto los planos de avances como los requerimientos mensuales se encuentran previamente establecidos

Lo anterior conlleva a la primera diferenciación con la etapa de producción. En este caso, lo único relevante para fines del modelo, y la obra general, es cumplir con el plan a un bajo costo y de manera eficiente. De modo que parámetros como las leyes, el material extraído, la cantidad de material enviado a los piques, etc., no resultan ser relevantes para la decisión de trabajar en un frente. Para fines de la preparación minera, la variable más importante es el cumplimiento de la proyección mensual.

Es sensato entonces suponer que toda la información atinente a las frentes a ser trabajadas se encuentra disponible. El flujo de información en la jefatura es el siguiente:



Figura 4-1: Flujo de información de Operaciones en Esmeralda.

De la reunión semanal surgen las labores a ser realizadas para toda la semana, de acuerdo a las órdenes del mandante, representado por un jefe de proyecto. Luego, esta información es manejada por el Jefe de Operaciones, quien distribuye las tareas a lo largo de cada día, informando a los respectivos Jefes de Turno de cuáles son las frentes que deben atacar durante su turno.

Finalmente, es el Jefe de Turno quien decide, de acuerdo a su dotación de personal y las capacidades de trabajo, cuál es el orden en que se realizarán las labores, cuales son las prioridades para este turno y cómo pretende entregar los quehaceres al turno siguiente. El Jefe de Turno es el responsable final de que las proyecciones semanales sean ejecutadas a tiempo.

4.1.2 Simplificaciones

En Esmeralda existen dos importantes eventos que limitan temporalmente el ciclo de avance diario: el inicio y fin de turno. Estas instancias son aprovechadas para realizar la tronadura, pues la División admite la detonación de explosivos sólo en horarios específicos, ya que estos implican aislamiento y evacuación de las zonas afectadas por los gases.

Es posible entonces afirmar que la tronadura tiene directa relación con el fin de turno. Es decir, no ocurre hasta llegado ese momento, afectando la continuidad del ciclo en ese punto.

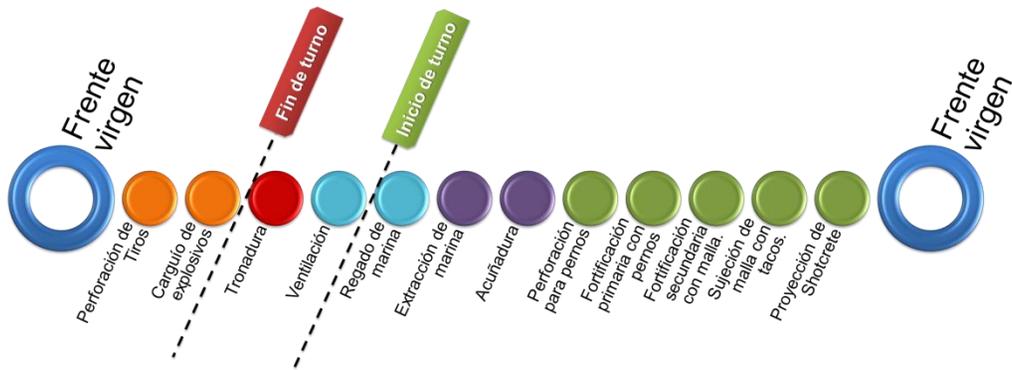


Figura 4-2: Interrupciones en el ciclo de avance.

Si el ciclo se reorganiza conforme a lo anterior, se tiene que el ciclo de una frente comienza con la ventilación de la misma, y termina con su posterior tronadura. Si tenemos en cuenta que también algunas tareas son simultáneas el ciclo puede reorganizarse de la siguiente manera:

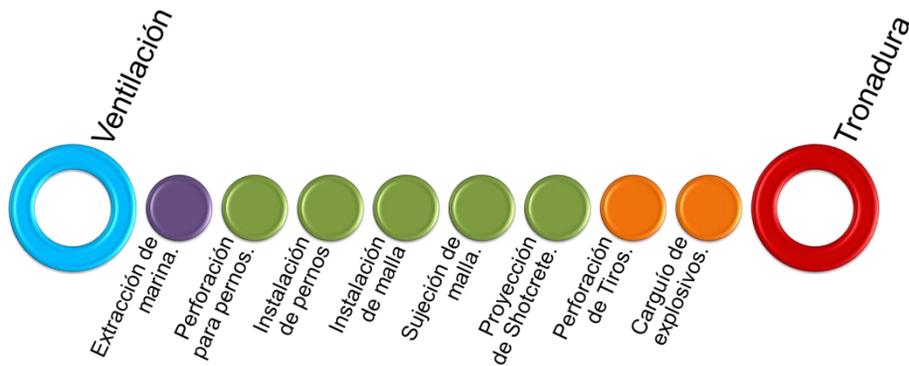


Figura 4-3: Ciclo de avance reordenado y simplificado.

El argumento para dicha simplificación es que algunas tareas se realizan de forma simultánea. El riego de la marina se realiza durante la primera hora del turno, una vez que la zona se encuentra libre de gases. Así se evita que continúe la emanación.

Por otro lado, la acuñadura es una tarea fundamental y debe realizarse cada vez que haya roca suelta a la vista en las paredes o el techo.

Finalmente, para fines del modelo, las etapas relevantes del ciclo son:

- Extracción de marina.
- Perforación para pernos.
- Instalación y lechado de pernos.
- Instalación de malla.
- Sujeción de malla.
- Proyección de shotcrete.
- Perforación de tiros.

Las que en adelante serán llamadas por los nombres cortos con que popularmente se les conoce en la faena: Marina, Fortificación, Lechado, Malla, Hilteo, Shotcrete y Perforación respectivamente.

4.1.3 *Objeto de maximización o minimización*

El parámetro a comparar en base a los resultados del modelo debe ser consistente con los requerimientos de la empresa contratista. Para preparación minera los costos son muy difíciles de cuantificar, ya que dependen en gran medida de los metros de avance por tronadura, las condiciones de la roca, la habilidad del operador, el criterio del inspector, etc.

Por otro lado, es sabido que mientras más rápido se concluya un contrato es más beneficioso para la empresa contratista, ya que se le paga una cantidad extra por su eficiencia y aumentan los retornos en períodos más tempranos.

Es por ello factible enfocar el análisis a la productividad del nivel. Bajo este criterio hay dos posibles opciones que permiten abarcar el sistema por completo:

4.1.3.1 *Utilización de equipos*

Pros:

- Se evita trabajar con costos, ingresos y otras variables confidenciales.
- Ayuda a disminuir el tiempo perdido.
- Tiene una implicancia indirecta sobre la producción.

Contras:

- La utilización de los equipos no necesariamente indica una mejora en la productividad. Su uso ineficiente le convierte en un mal indicador y puede terminar siendo un incentivo para los operadores a tener las máquinas funcionando más tiempo del necesario.
- No entrega un resultado que sea cuantificable de forma directa en términos monetarios.
- Prácticamente imposible de medir por parte de la supervisión. Requiere de alimentación desde los operadores.

4.1.3.2 *Ciclos completados*

Pros:

- Se evita trabajar con costos, ingresos y otras variables confidenciales.
- Apunta a un aumento en la mejora de la eficiencia de equipos y no el tiempo de uso.
- Los ciclos completados son proporcionales a los metros de avance vendidos al final del día, por lo que es un buen indicador económico a maximizar.

- La información está disponible y queda registrado a diario en el “libro de novedades”.

Contras:

- La variabilidad asociada a la tronadura y sus metros de avance implica que no siempre los ciclos se mantienen constantes.

4.1.4 Definición de Frentes Equivalentes

De acuerdo a lo anterior, para el primer caso difícilmente se podrá obtener la utilización real para cada uno de los equipos a lo largo del día completo. Esa información es manejada directamente por los operadores y no se registra de forma precisa. Por otro lado, los ciclos completados se ven reflejados en los estados iniciales y finales reportados diariamente en el “libro de novedades” de los jefes de turno.

Por lo descrito anteriormente, se decide trabajar en base a los ciclos completados. En promedio no debiese tener efecto alguno si un día la tronadura es más eficiente que en otro. Se asume que el diseño de la perforación y tronadura son apropiados.

Del ciclo de avance se manejan los siguientes tiempos de ciclo:

Tiempos de ciclo	Horas	Minutos	% del ciclo
Marina	2.60	156	14.7%
Fortificación	2.46	148	13.9%
Lechado	2.52	151	14.2%
Malla	2.25	135	12.7%
Hilteo	2.46	148	13.9%
Shotcrete	2.08	125	11.7%
Perforación	3.37	202	19.0%
Total	17.74	1064	100%

Tabla 4-1: Tiempos de ciclo de operaciones unitarias.

Se define una “Frente Equivalente” como el tiempo de trabajo efectivo necesario para completar el ciclo completo de avance. Es decir, una frente equivalente corresponde a 1064 minutos de trabajo.

Utilizando el tiempo del ciclo total como ponderador, en la tabla anterior se tiene la fracción de una frente equivalente que representa cada una de las etapas del ciclo. Es decir, realizar la fortificación completa corresponde a 0.139 frentes equivalentes. Si se realiza sólo una fracción de esta, se pondera por la fracción de tiempo trabajada respecto al tiempo de ciclo.

4.2 Caso de estudio

4.2.1 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales utilizadas para alimentar el modelo fueron seleccionadas de uno de los días en que se encontraba toda la flota de equipos operativa, y en que no se registra ninguna pérdida operacional por falla mecánica. Además, este escenario no tiene interrupciones por tronadura asociadas al mandante que pudiesen afectar el desempeño normal de la gestión efectuada por el Jefe de Turno.

4.2.2 Plan de corto plazo

El área de operaciones, en conjunto con Oficina Técnica, diariamente proporciona al Jefe de Turno un número de 14 frentes para trabajar durante la semana. Teóricamente este número es suficiente para que se pueda cumplir el plan semanal, según los estudios realizados de forma interna por la empresa.

El día registrado corresponde al viernes 16 de agosto de 2013. Las condiciones iniciales para cada una de las labores a trabajar según el programa de corto plazo son:

N°	Labor	Etapas siguientes
1	ACCESO 5 FW C-53	Fortificación
2	ACCESO 5 FW C-59	Fortificación
3	C-27 SUR ACCESO 4	Shotcrete
4	C-31 NORTE ACCESO 5	Shotcrete
5	C31 NORTE ACCESO 5 CAV	Perforación
6	C-35 NORTE ACCESO 5 CAV	Hilteo
7	C-35 SUR ACCESO 4	Fortificación
8	C-39 SUR Z-49	Marina
9	C-47 SUR Z-35	Hilteo
10	C-47 SUR Z-44	Lechado
11	C-53 NORTE ACCESO 5	Hilteo
12	C-53 SUR ACCESO 4	Fortificación
13	C-53 SUR Z-44	Marina
14	C-57 SUR ACCESO 4	Marina

Tabla 4-2: Condiciones iniciales de labores según plan de corto plazo.

Por otro lado, la flota de equipos disponibles para Minería es la siguiente:

Equipo	Modelo	Etapa
E332	ST 1030	Marina
E339	ST 1030	Marina
E340	ST 1030	Marina
E123	Rocket Boomer 281	Fortificación
E138	Boomer S1D	Fortificación
E145	Boomer S1D	Fortificación
E265A	JCB 533-105	Lechado
E266A	JCB 533-105	Lechado
E267A	JCB 533-105	Malla
E268A	JCB 533-105	Malla
E271A	JCB 533-105	Hilteo
E272A	JCB 533-105	Hilteo
E646	ALPHA 20	Shotcrete
EA35	ALPHA 20	Shotcrete
E148	Boomer 282	Perforación
E156	Boomer M2C	Perforación
E161EA	Boomer 282	Perforación

Tabla 4-3: Flota de equipos disponibles.

Lamentablemente no existe un resultado operacional para dicho escenario, pues la ejecución llevada a cabo por los Jefes de Turno no es fiel a lo demandado por la planificación a corto plazo de la obra en cuestión, según se explica en la sección siguiente. Se asume que se cumple el objetivo diario de completar 6 frentes trabajadas, o frentes equivalentes.

4.2.3 Realidad operacional

Revisando el libro de novedades de los Jefes de Turno, la fuente de información más confiable actualmente, se aprecia que ese día no se trabajaron las 14 frentes incluidas en el programa, sino que en total fueron 21 entre ambos turnos.

Ello indica que los Jefes de Turno están conscientes de una insuficiencia del programa a corto plazo y saben que deben trabajar en más frentes para aumentar el resultado operacional. Es lógico concluir que será imposible tener el total de equipos trabajando si se posee un número de puntos de trabajo disponibles menor, de modo que la decisión de los Jefes de Turno parece ser la más apropiada.

Las condiciones iniciales para el caso real estudiado son las siguientes:

N°	Labor	Etapas siguientes
1	ACCESO 5 FW C-53	Fortificación
2	ACCESO 5 FW C-59	Fortificación
3	C-27 SUR ACCESO 4	Shotcrete
4	C-31 NORTE ACCESO 5	Shotcrete
5	C31 NORTE ACCESO 5 CAV	Perforación
6	C-35 NORTE ACCESO 5 CAV	Hilteo
7	C-35 SUR ACCESO 4	Fortificación
8	C-39 SUR Z-49	Marina
9	C-47 SUR Z-35	Hilteo
10	C-47 SUR Z-44	Lechado
11	C-53 NORTE ACCESO 5	Hilteo
12	C-53 SUR ACCESO 4	Fortificación
13	C-53 SUR Z-44	Marina
14	C-57 SUR ACCESO 4	Marina
15	Fr Marina C27 HW	Shotcrete
16	Repele C-53 NORTE ACCESO 4	Marina
17	Z42 FW C57	Hilteo
18	Z42 HW C57	Hilteo
19	Z43 FW C57	Fortificación
20	Z49 FW C39	Marina
21	Z49 FW C59	Marina

Tabla 4-4: Condiciones iniciales de labores según realidad operacional

Del trabajo realizado en dicho día usando la gestión de recursos hecha por el Jefe de Turno, se tienen los siguientes resultados:

N°	Nombre de la labor	Trabajos en el turno						
		Marina	Fortificación	Lechado	Malla	Hilteo	Shotcrete	Perforación
1	ACCESO 5 FW C-53		1					
2	ACCESO 5 FW C-59		1	1	1	1		
3	C-27 SUR ACCESO 4						1	
4	C-31 NORTE ACCESO 5						1	1
5	C31 NORTE ACCESO 5 CAV							1
6	C-35 NORTE ACCESO 5 CAV					1		
7	C-35 SUR ACCESO 4		1	1	1			
8	C-39 SUR Z-49	1						
9	C-47 SUR Z-35					1	1	1
10	C-47 SUR Z-44			1	1	1	1	
11	C-53 NORTE ACCESO 5					1	1	1
12	C-53 SUR ACCESO 4		1					
13	C-53 SUR Z-44 (+ 53OP38AS)	1	1					
14	C-57 SUR ACCESO 4	1	1					
15	Fr Marina C27 Hw						1	
16	Repele C-53 NORTE ACCESO 4	1						
17	Z42 Fw C57					1	1	1
18	Z42 Hw C57					1		
19	Z43 Fw C57		1	1	1			
20	Z49 Fw C39	1	1					
21	Z49 Fw C59	1	1	1	1			

Tabla 4-5: Trabajos realizados en caso base

Las labores señaladas con un número 1, son las que fueron completadas en dicha oportunidad. Ponderando cada una de las tareas por su fracción del ciclo completo de avance, el resultado obtenido por esta planificación de los Jefes de Turno para ese día es de 6.22 Frentes Equivalentes.

Los dos casos presentados, Plan de Corto Plazo y Realidad Operacional, serán los que alimentarán los modelos propuestos y servirán para contrastar el desempeño de la gestión realizada con los resultados entregados por el algoritmo.

4.3 Modelo matemático

Antes de entrar en la proposición de un modelo basado en GNU MathProg, es necesario escribirlo en términos generales. Es decir, como un modelo de optimización típico y que no sea dependiente de la notación y sintaxis específicas del lenguaje a utilizar.

Sean:

- f_j : frente de trabajo i .
- e_j : etapa j del ciclo de avance.
- t_k : período k del turno.

$$\begin{aligned} f_i, \text{ con } i \in \{1, \dots, m\} \\ e_j, \text{ con } j \in \{1, \dots, n\} \\ t_k, \text{ con } k \in \{1, \dots, l\} \end{aligned}$$

Sea X_{f_i, e_j, t_k} la variable correspondiente a realizar en la frente f_i la etapa e_j del ciclo, durante el período t_k .

$$X_{f_i, e_j, t_k} \in [0, 1]$$

Para cada período k -ésimo se tiene una matriz del tipo:

$$\begin{bmatrix} X_{f_1, e_1, t_k} & \cdots & X_{f_1, e_n, t_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{f_m, e_1, t_k} & \cdots & X_{f_m, e_n, t_k} \end{bmatrix}$$

Restricción 1

No puede realizarse más de una tarea simultánea por frente en un mismo período.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n X_{f_i, e_j, t_k} \leq 1 \\ \forall i \in \{1, \dots, m\}, \forall k \in \{1, \dots, l\} \end{aligned}$$

Restricción 2

El tiempo trabajado en una etapa no puede superar el necesario para completarla:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^l X_{f_i, e_j, t_k} \leq TC_{e_j} \\ \forall i \in \{1, \dots, m\}, \forall j \in \{1, \dots, n\} \end{aligned}$$

Restricción 3

La cantidad máxima de una etapa que se puede realizar por período está dada por el número de equipos que pueden realizar dicha etapa.

$$\sum_{i=1}^m X_{f_i, e_j, t_k} \leq E_j$$
$$\forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, l\}$$

Con E_j : Capacidad máxima de equipos para la labor e_j por período.

Restricción 4

Deben estar listas todas las etapas anteriores del ciclo:

$$\frac{\sum_{k < s} X_{f_i, e_{j-1}, t_k}}{TC_{e_{j-1}}} \geq X_{f_i, e_j, t_s}$$
$$\forall i \in \{1, \dots, m\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall k \in \{1, \dots, l\}$$

Con TC_{e_j} : Tiempo de ciclo necesario para completar la etapa j .

Función objetivo

Sean f las frentes de trabajo, e las etapas de ciclo y t los períodos.

$$\max \sum_{k=1}^l \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m X_{f_i, e_j, t_k}$$

Total de variables del modelo:

$$m \times n \times l$$

Con

- m : Número de frentes de trabajo disponibles.
- n : Número de etapas del ciclo.
- l : Número de períodos.

4.3.1 Programación lineal

4.3.1.1 Plan de corto plazo

Para el caso base el modelo lineal fue planteado para un máximo de 82 periodos, considerando las 14 frentes del programa de corto plazo y el ciclo de 7 etapas. Con un mayor número de periodos el software GLPK es incapaz de cargar el archivo con las definiciones. El resumen del modelo es el siguiente:

Variables de decisión	7,938
Restricciones tipo 1	1,134
Restricciones tipo 2	98
Restricciones tipo 3	567
Restricciones tipo 4	7,938

Tabla 4-6: Resumen de modelo lineal sobre plan de corto plazo.

Resultados

- Tiempo de ejecución: 20.547 segundos
- Períodos para completar una frente: 116 periodos
- Períodos trabajados: 902.996 periodos
- Frentes equivalentes: 7.78 frentes

4.3.1.2 Realidad operacional

Para este caso el modelo lineal admite un máximo de 54 periodos considerando 21 frentes de trabajo y un ciclo de 7 etapas.

Variables de decisión	7,938
Restricciones tipo 1	1,134
Restricciones tipo 2	147
Restricciones tipo 3	378
Restricciones tipo 4	7,938

Tabla 4-7: Resumen de modelo lineal sobre caso real.

Resultados

- Tiempo de ejecución: 15.172 segundos
- Períodos para completar una frente: 77 periodos
- Períodos trabajados: 753.54 periodos
- Frentes equivalentes: 9.786 frentes

4.3.1.3 Limitantes

Este modelo entrega una solución muy rápida y mejor que la obtenida actualmente por el Jefe de Turno. Sin embargo, el tipo de soluciones que entrega no son factibles operacionalmente. Muchas variables de decisión toman valores fraccionarios a lo largo del tiempo, indicando que efectivamente se trabajó en una labor, pero no fue completada.

Frente 1																		
Etapa	Períodos																	
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4									
2										0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3		
3																	0.1	0.1
4																		
5																		
6																		

Tabla 4-8: Resultados fraccionarios en modelo lineal

Cualquier etapa con un valor fraccionario menor que el de la etapa anterior cumple las restricciones de precedencia, resultado que en la práctica es inviable, pues por motivos operacionales y de seguridad las labores no pueden entregarse sin ser terminadas.

Para fines del modelo este resultado es óptimo, de rápida solución y con un buen resultado, pero no es aplicable a la realidad.

4.3.2 Programación entera

El modelo de programación entera se rige por las mismas restricciones que el modelo de programación línea. Sin embargo, este contempla que todas las variables de decisión deben ser binarias, es decir, pueden tomar el valor 0 o 1. De esta manera se evita que las variables de decisión tomen valores fraccionarios que cumplan las restricciones de precedencia.

El algoritmo de solución utilizado por GLPK para resolver este tipo de problemas es muy costoso computacionalmente. En vista de que el plan debe ser generado a comienzo de turno y es fundamental para realizar la ejecución de las distintas labores del día, se obliga al programa a entregar una solución en un rango máximo de tiempo de 42 minutos. El tiempo promedio que actualmente toma la nombrada a comienzos de turno.

4.3.2.1 Plan de corto plazo

El máximo número de períodos utilizables para que el plan se resolviese en un tiempo razonable es de 10 períodos. Cada uno de 78 minutos.

Variables de decisión	980
Restricciones tipo 1	140
Restricciones tipo 2	98
Restricciones tipo 3	70
Restricciones tipo 4	980

Tabla 4-9: Resumen de modelo entero sobre plan de corto plazo.

- Tiempo de ejecución: 17.1 segundos.
- Períodos para completar una frente: 16 períodos.
- Períodos trabajados: 100 períodos.
- Frentes equivalentes: 6.25 frentes.

4.3.2.2 Realidad operacional

Para el caso real el número de períodos debe ser aún menor, llegando a un máximo de 5 que permita resolver el problema en un tiempo apropiado.

Variables de decisión	735
Restricciones tipo 1	105
Restricciones tipo 2	147
Restricciones tipo 3	35
Restricciones tipo 4	735

Tabla 4-10: Resumen de modelo entero sobre caso real.

Resultados

- Tiempo de ejecución: 1.656 segundos
- Períodos para completar una frente: 9 períodos
- Períodos trabajados: 66 períodos
- Frentes equivalentes: 7.33 frentes

4.3.2.3 Limitantes

Un nuevo problema que surge del uso de este método es la discontinuidad inducida en la ejecución de las distintas etapas. Es decir, el modelo admite que una etapa sea pausada para terminarla más tarde o simplemente es mejor que quede inconclusa. Los resultados arrojados pueden ser del tipo 010, 101, etc.

Perforación (7)																																
Frente	Períodos																															
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
6	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
13	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0
14	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4-11: Discontinuidades temporales en modelo entero

Si bien matemáticamente es correcto, es una solución que no puede ser llevada a la práctica. En minería, mover un equipo de un lado a otro implica tanto un costo de transporte e instalación, como una pérdida de tiempo. Materiales como la lechada y el hormigón deben ser utilizados en un período de tiempo definido y no pueden quedar estancados aguardando la continuación de la labor.

4.3.3 Programación entera con post-proceso

Una alternativa de solución a la no-factibilidad de las soluciones arrojadas por el modelo de programación entera corresponde a forzar las variables que producen la discontinuidad en el resultado.

El caso que se repite en distintas combinaciones es cuando hay un período en que no se trabaja antes de que se termine la tarea o acabe el día. Al encontrar dichas discontinuidades el algoritmo fuerza un 1 o un 0, dependiendo de su factibilidad sujeta al resto de las restricciones.

4.3.3.1 Plan de corto plazo

Para este caso el número de períodos utilizados es el mismo que en el caso anterior. El problema a resolver es similar, sólo que se resuelve 7 veces en este caso, cada una forzando una variable a 0 o 1.

Variables de decisión	980
Restricciones tipo 1	140
Restricciones tipo 2	98
Restricciones tipo 3	70
Restricciones tipo 4	980

Tabla 4-12: Resumen de modelo entero forzado sobre plan de corto plazo.

Resultados

- Tiempo de ejecución: 329.703 segundos.
- Períodos para completar una frente: 16 períodos.
- Períodos trabajados: 101 períodos.
- Frentes equivalentes: 6.31.

4.3.3.2 Realidad operacional

De manera análoga al modelo sin forzar, se tiene el siguiente modelo:

Variables de decisión	735
Restricciones tipo 1	105
Restricciones tipo 2	147
Restricciones tipo 3	35
Restricciones tipo 4	735

Tabla 4-13: Resumen de modelo entero forzado sobre caso real.

Resultados

- Tiempo de ejecución: 1.625 segundos.
- Períodos para completar una frente: 9 períodos.
- Períodos trabajados: 66 períodos.
- Frentes equivalentes: 7.33 frentes.

4.3.3.3 Limitantes

La desventaja de este método es que está condicionado a los resultados que entregue el modelo de programación entera, dando un resultado peor que el anterior. Es decir, se produce una desviación del óptimo al agregar restricciones ajenas al problema. Además se arriesga el incumplimiento de alguna de las restricciones del problema al forzar las variables o la caída en un ciclo infinito al rescribir el problema y forzar una única variable en cada iteración.

4.4 Modelo heurístico

Una nueva alternativa puede ser resuelta viendo el problema desde la misma perspectiva que una empresa contratista. Se tiene que el orden en que sean trabajadas dos frentes en condiciones iguales es irrelevante. El ingreso se calcula en base a los metros de avance, independiente de la ubicación de la labor o su ordenamiento en el programa.

Para hallar algunas heurísticas que ayuden a resolver el problema se realiza una asignación manual sobre unas condiciones iniciales genéricas:

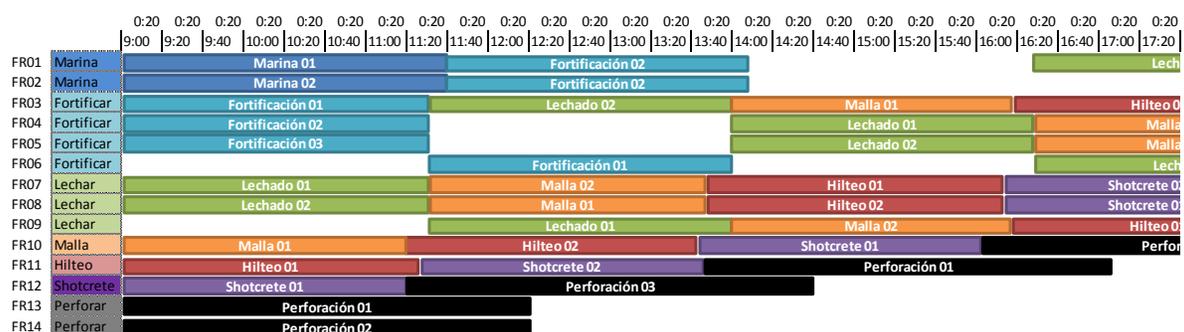


Figura 4-4: Asignación manual.

Lo primero es identificar y ordenar las etapas según su orden en el ciclo. Las últimas etapas son las más importantes y las que menos efecto tienen sobre las otras, por lo que las frentes para perforar son las primeras en ser asignadas.

Como se trata de un proceso secuencial, se deduce que la etapa que condicionará el número máximo de frentes que se puede trabajar en un día es necesariamente la etapa más lenta. Para hallar dicha etapa es necesario calcular cuál es la que tiene un menor rendimiento por unidad de tiempo, en función de su número de equipos y tiempo de ciclo.

Etapa	Tiempo de ciclo [h]	Tiempo de ciclo [min]	% del total del ciclo	Nº de equipos	Velocidad [ciclos/h]
Marina	2.60	156	14.7%	3	1.15
Fortificación	2.46	148	13.9%	3	1.22
Lechado	2.52	151	14.2%	2	0.79
Malla	2.25	135	12.7%	2	0.89
Hilteo	2.46	148	13.9%	2	0.81
Shotcrete	2.08	125	11.7%	2	0.96
Perforación	3.37	202	19.0%	3	0.89

Tabla 4-14: Velocidad de etapas del ciclo de avance

Resulta lógico entonces pensar que los primeros equipos en ser asignados debiesen ser los encargados del lechado. Pero como el proceso es secuencial, cualquier etapa posterior no afectará esta limitante, por lo que es razonable comenzar trabajando en las frentes que se encuentran más “avanzadas”.

Enumerando cada una de las etapas, y considerando el porcentaje completo inicialmente, puede asignarse una prioridad relativa a la operación de lechado.

Etapas	Índice
Marina	0
Fortificación	1
Lechado	2
Malla	3
Hilteo	4
Shotcrete	5
Perforación	6

Tabla 4-15: Asignación de índices a etapas.

La prioridad asignada a cada frente es:

$$Prioridad = J + \frac{c_J}{100}$$

Donde

J : Índice de la etapa en que se encuentra inicialmente la frente.

c_J : Fracción completada de la etapa J para dicha frente.

Algunas de las ventajas que posee esta aproximación al problema son que las horas de trabajo pueden ser discretizadas en períodos muy pequeños, pues el uso de memoria física del computador es mínimo.

Para asegurar el uso eficiente de la maquinaria se asignan con mayor prioridad aquellos equipos que llevan más tiempo inactivo. De esta forma existe una mayor probabilidad de que hayan completado su asignación anterior y se encuentren efectivamente disponibles, a diferencia de aquellos que tienen una menor holgura de tiempo entre tareas.

Las 13 horas de trabajo se discretizan en minutos. Es decir, se contempla un total de 780 períodos para el plan diario.

4.4.1 *Plan de corto plazo*

Se obtienen los siguientes resultados bajo esta metodología:

- Tiempo de ejecución: 15 milisegundos
- Períodos para completar una frente: 1064 períodos
- Períodos trabajados: 8187 períodos
- Frentes equivalentes: 7.695 frentes

4.4.2 *Realidad operacional*

Para el caso con 21 frentes se tiene lo siguiente:

- Tiempo de ejecución: 16 milisegundos.
- Períodos trabajados: 9973 períodos.
- Períodos para completar una frente: 1064 períodos.
- Frentes equivalentes: 9.373.

4.4.3 *Limitantes*

La limitante de este modelo es que el resultado entregado no es óptimo al incorporar heurísticas para resolver el problema.

4.5 Resultados de los modelos de asignación de recursos.

4.5.1 Plan de corto plazo

Al trabajar sobre el plan de corto plazo y ejecutar cada uno de los modelos sobre el caso inicial, se tienen los siguientes resultados:

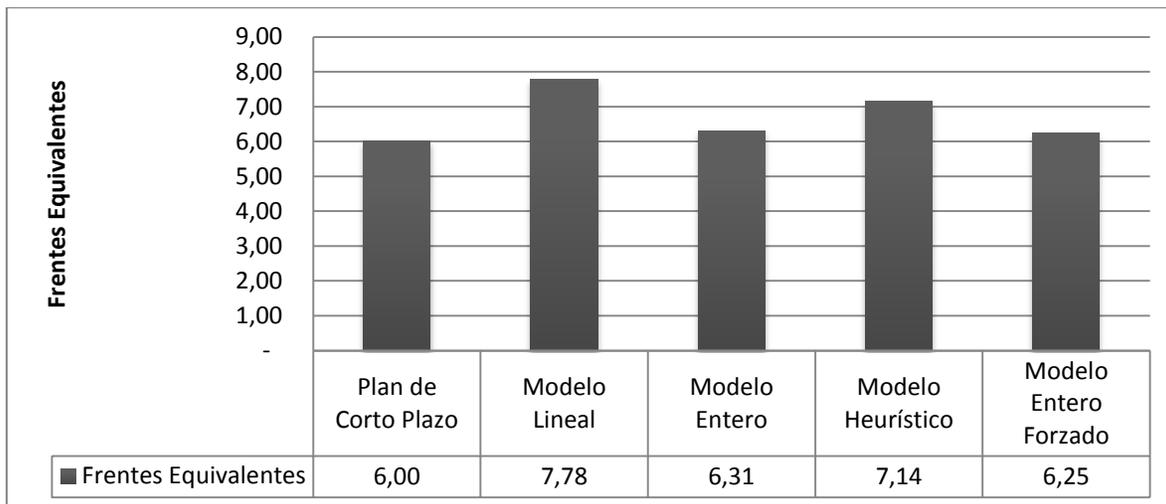


Figura 4-5: Comparación de resultados de modelos sobre plan de corto plazo.

Para cada uno de estos casos se tiene la mejora porcentual que representan respecto a la actual planificación:

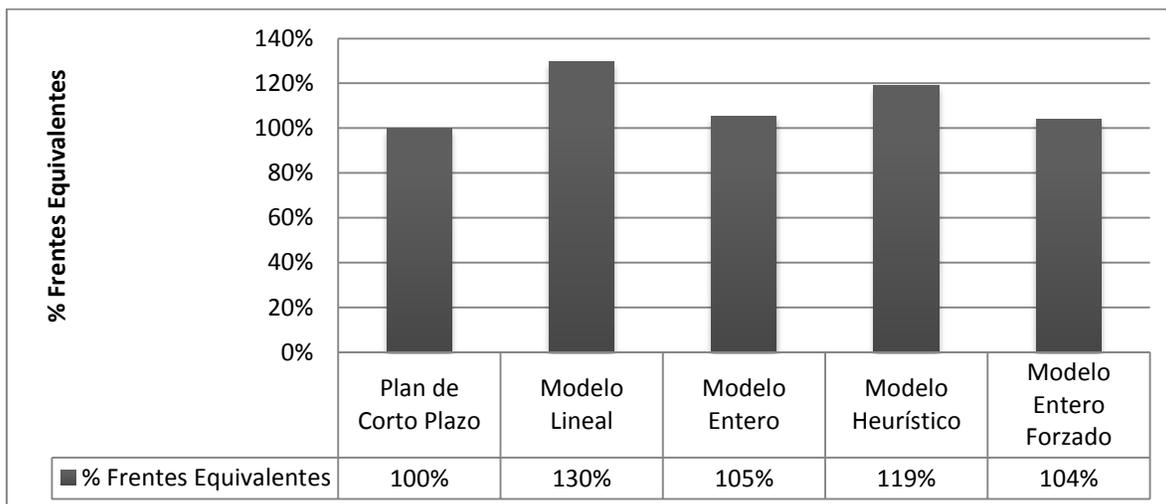


Figura 4-6: Comparación porcentual de resultados sobre plan de corto plazo.

Finalmente, el tiempo de ejecución de cada uno de los modelos:

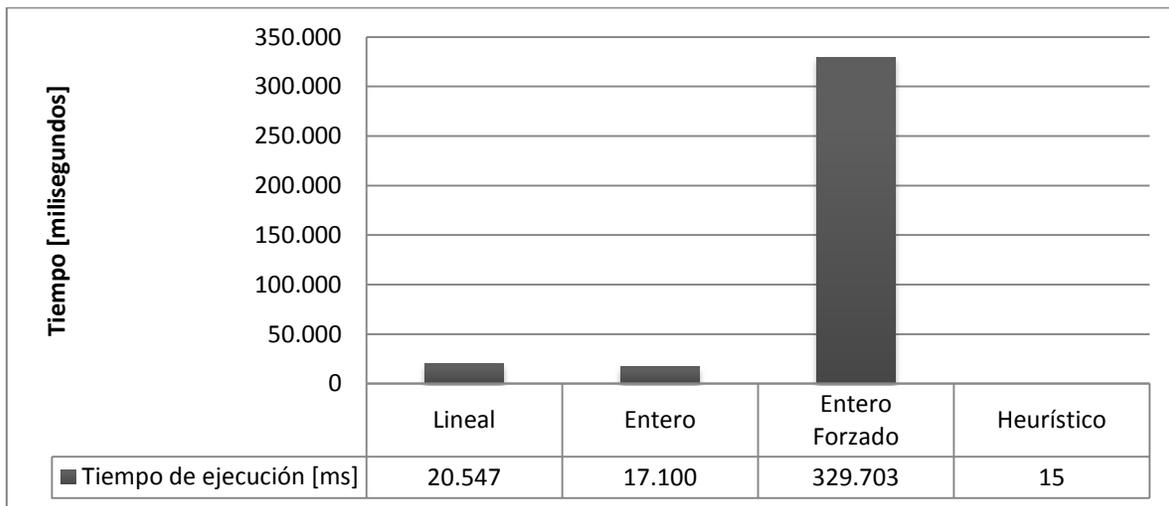


Figura 4-7: Comparación de tiempos de ejecución sobre plan de corto plazo.

4.5.2 Caso real

De manera análoga, para el caso real, trabajado por operaciones, se tienen los siguientes resultados para los distintos modelos planteados:

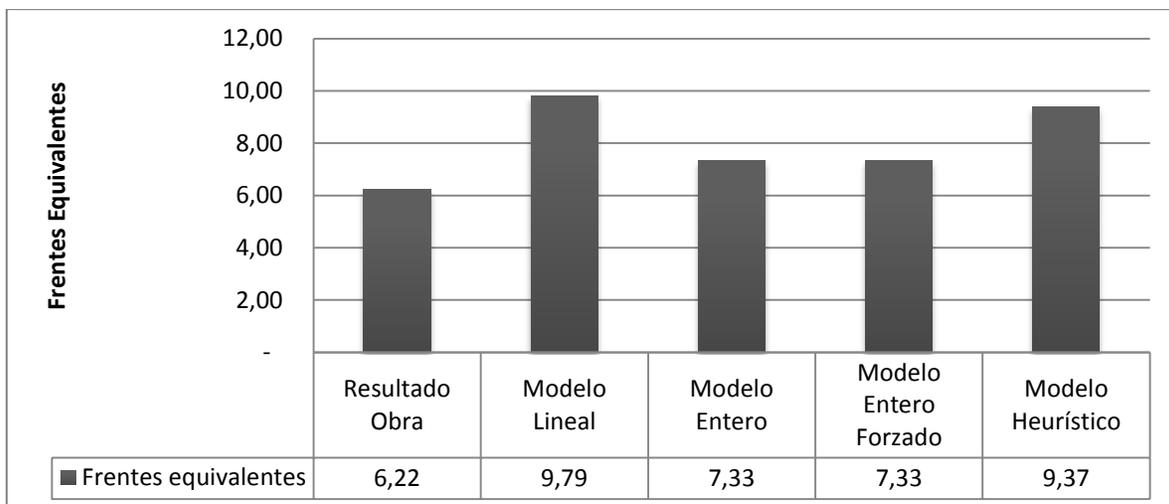


Figura 4-8: Comparación de resultados de modelos sobre caso real.

La diferencia porcentual es la siguiente:

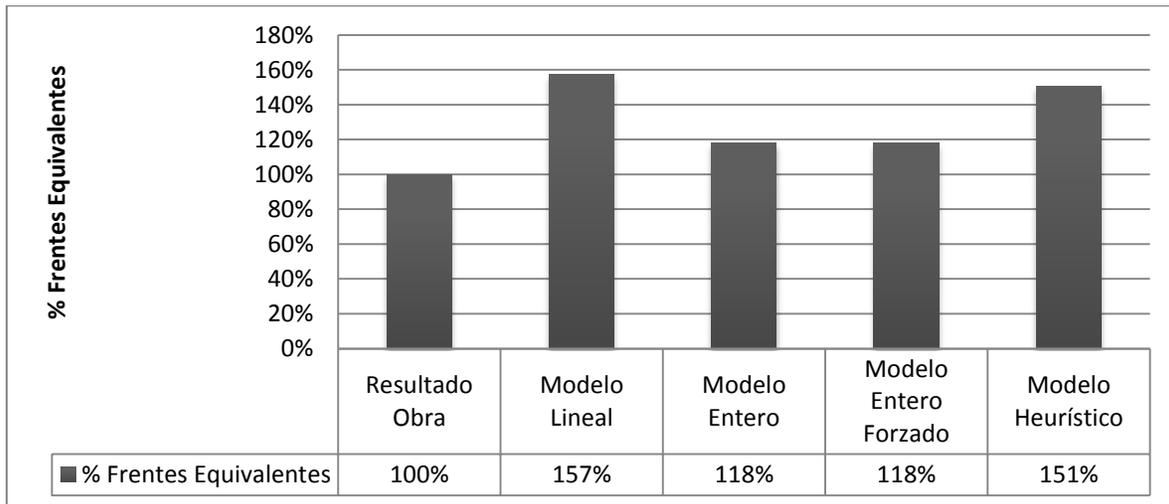


Figura 4-9: Comparación porcentual de resultados sobre caso real.

Mientras que los tiempos de ejecución se recopilan en la siguiente figura:

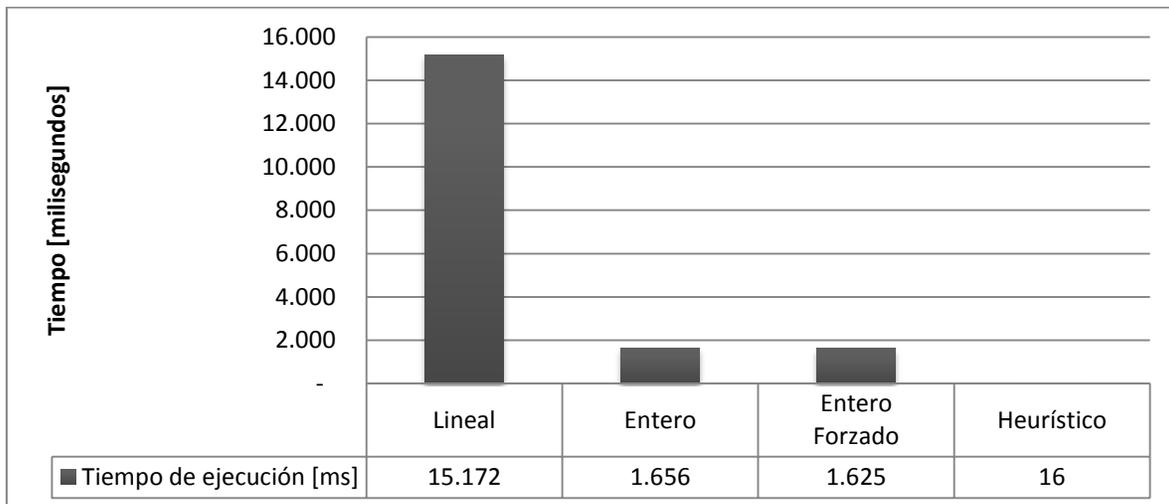


Figura 4-10: Comparación de tiempos de ejecución de modelos sobre caso real.

4.6 Resultado en Frentes Equivalentes

De los resultados numéricos de los distintos modelos se tiene que el mejor es el modelo lineal. Ello se debe a que tiene una mayor libertad en la asignación de valor a las variables de decisión y, en consecuencia, la solución que entrega es una no factible.

Por otro lado, el modelo entero se ve gravemente afectado por el pequeño número de períodos definidos. Al aproximar los tiempos de ciclo al entero superior se está desperdiciando parte importante del tiempo útil. Es por ello que esta aproximación no consigue un resultado muy superior al original. Tampoco está asegurada la factibilidad de este modelo debido a sus limitantes ya mencionadas.

Al forzar el modelo entero, el resultado es aún peor. A la poca cantidad de períodos se suma la desviación del óptimo debido al forzamiento de las variables.

Finalmente, el modelo heurístico obtiene un resultado casi tan bueno como el modelo lineal. Este último, a pesar de no ser factible, nos permite validar el modelo heurístico respecto al óptimo matemático, demostrando que es posible obtener una solución aún muy superior al resultado original obtenido por el Jefe de Turno y que cumpla con todos los requisitos iniciales del modelo. Esta última aproximación garantiza la factibilidad de la solución y tiene la ventaja de tomar muy poco tiempo en realizar la asignación. Además permite discretizar la jornada en períodos muy pequeños, evitando que los tiempos de ciclo sean mayores de lo normal sólo por limitantes del modelo.

El resultado obtenido no sólo permite mejorar el actual uso de los recursos, sino que también promete una disminución del tiempo que toma el proceso de asignación de posturas a comienzos del turno.

4.6.1 Elección del modelo

El modelo lineal es el que aporta un mejor resultado. Sin embargo, la totalidad de los modelos matemáticos fueron incapaces de aportar resultados prácticos a la operación, pues entregaban soluciones que no eran aplicables a un caso real o estaban demasiado simplificadas.

Dada las dificultades a las que se vieron enfrentados los primeros modelos, se decide optar por trabajar en adelante sólo usando el modelo heurístico. Este provee de soluciones rápidas al problema, que cumplen todos los requisitos necesarios para ser aplicadas en un escenario real y además son superiores a las conjeturadas por el Jefe de Turno.

4.7 Incorporación de variables aleatorias

La aleatoriedad puede ser incorporada al modelo desde el input de los tiempos de ciclo para cada una de las operaciones unitarias. Lo primero es realizar un análisis sobre los datos de los cuales se dispone.

El número de datos puntuales es grande, pero es insuficiente para obtener una buena aproximación en cada una de las operaciones unitarias del tipo de distribución que siguen. Por ello se asume como primera aproximación que estos siguen una distribución normal.

“I can only recognize the occurrence of the normal curve – the Laplacian curve of errors – as a very abnormal phenomenon. It is roughly approximated to in certain distributions; for this reason, and on account for its beautiful simplicity, we may, perhaps, use it as a first approximation, particularly in theoretical investigations.”

Pearson (1901)

A fin de probar que los datos efectivamente pueden estar distribuidos según una normal, se realiza el test de Anderson-Darling sobre cada conjunto de datos agrupados según operación unitaria.

Esta es una prueba no paramétrica sobre si los datos de una muestra provienen de una distribución específica.

El test de Anderson-Darling se define como:

H_0 : Los datos siguen la distribución especificada.

H_a : Los datos no siguen la distribución especificada.

El estadístico del test de Anderson-Darling se define como:

$$A^2 = -n - S$$

Donde

$$S = \sum_{i=1}^N \frac{(2i-1)}{N} [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{N+1-i}))]$$

F es la distribución acumulada para la distribución específica. Notar que Y_i son los datos ordenados.

Para cada una de las etapas se tienen las siguientes funciones de densidad de probabilidad:

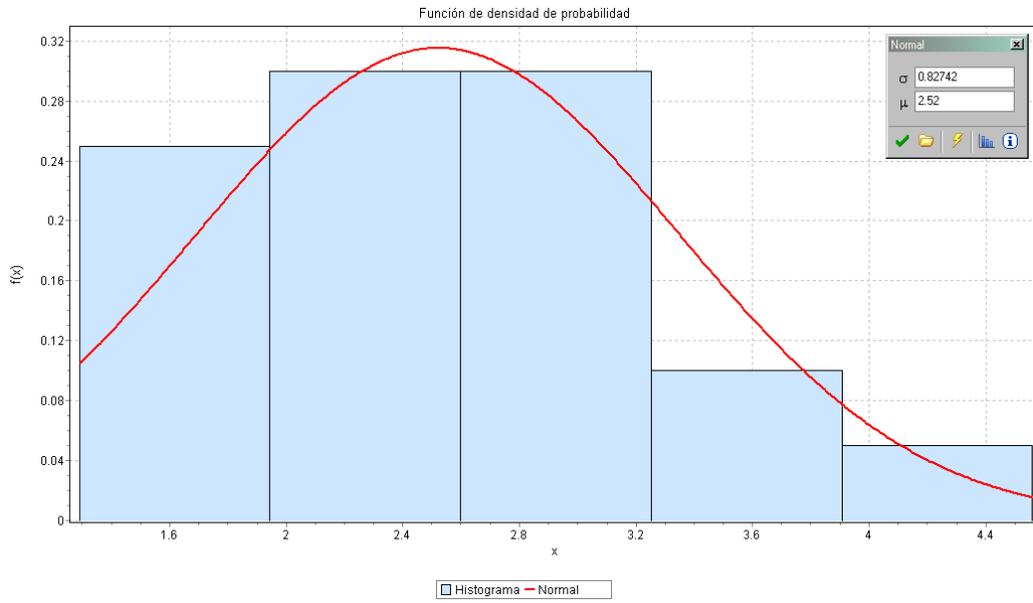


Figura 4-11: Marina - Función de densidad de probabilidad

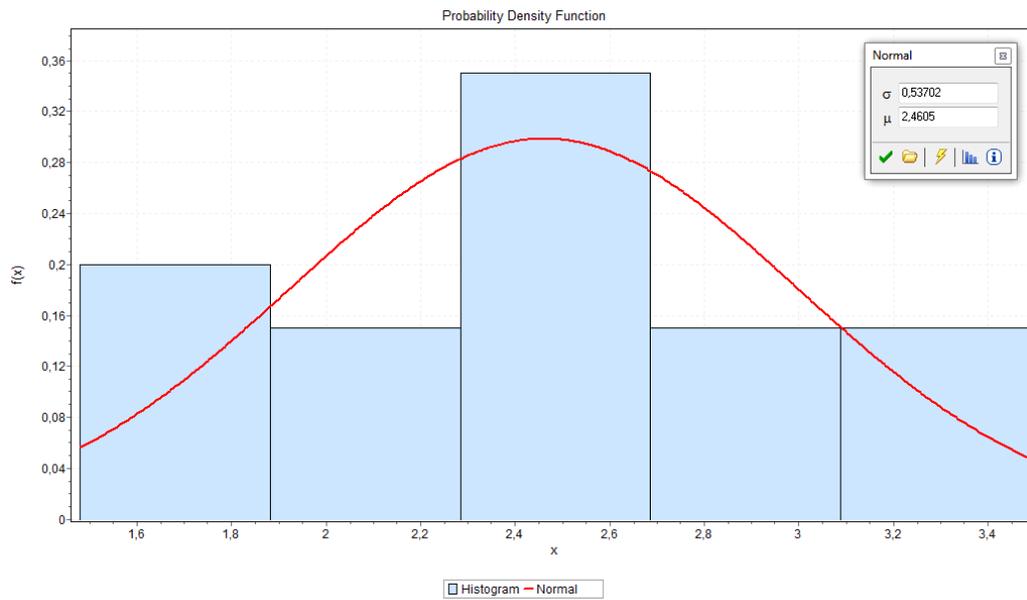


Figura 4-12: Fortificación - Función de densidad de probabilidad

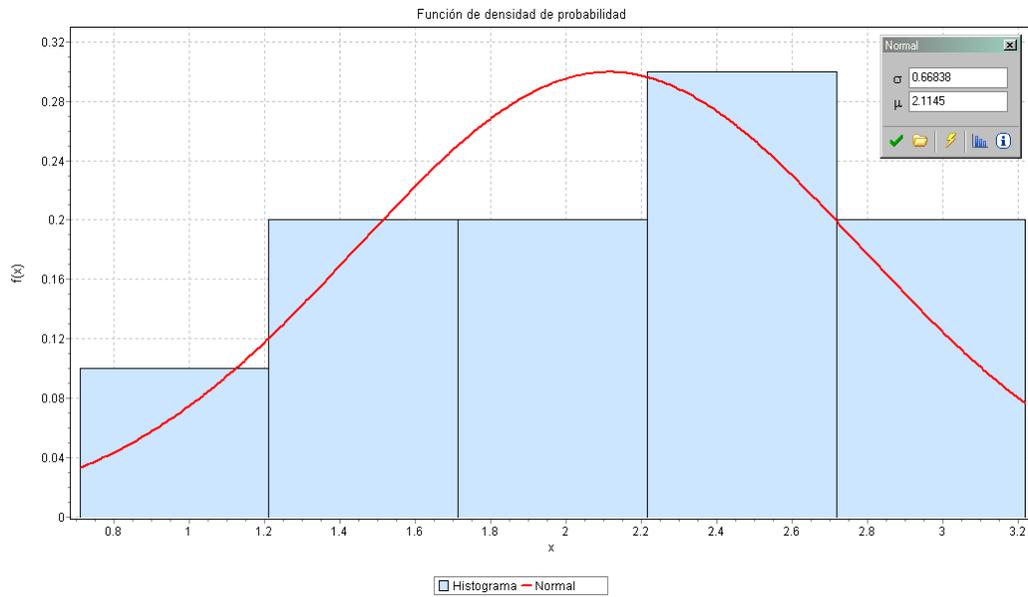


Figura 4-13: Lechado - Función de densidad de probabilidad

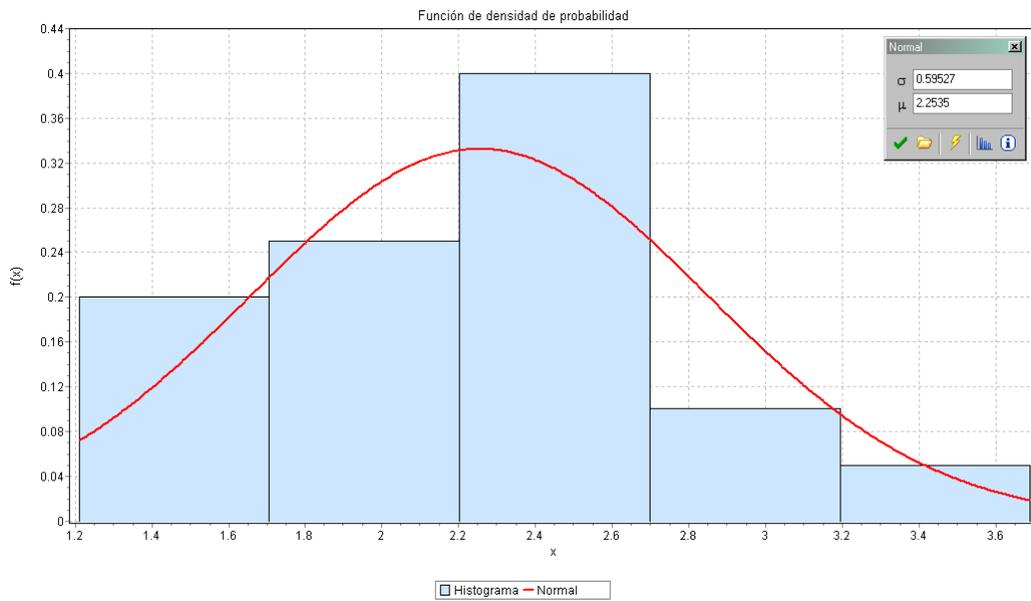


Figura 4-14: Malla - Función de densidad de probabilidad

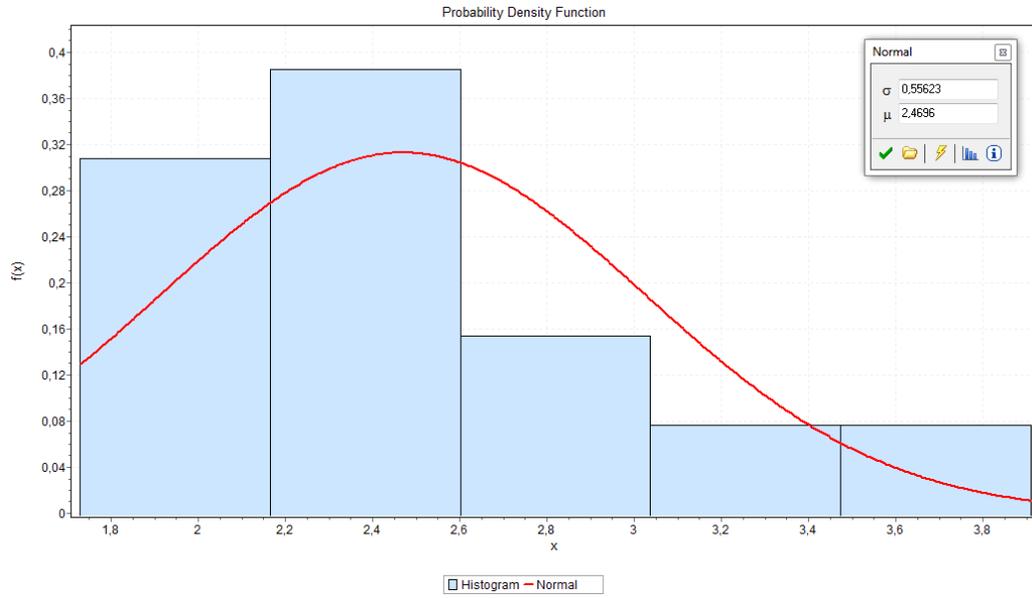


Figura 4-15: Hilteo - Función de densidad de probabilidad

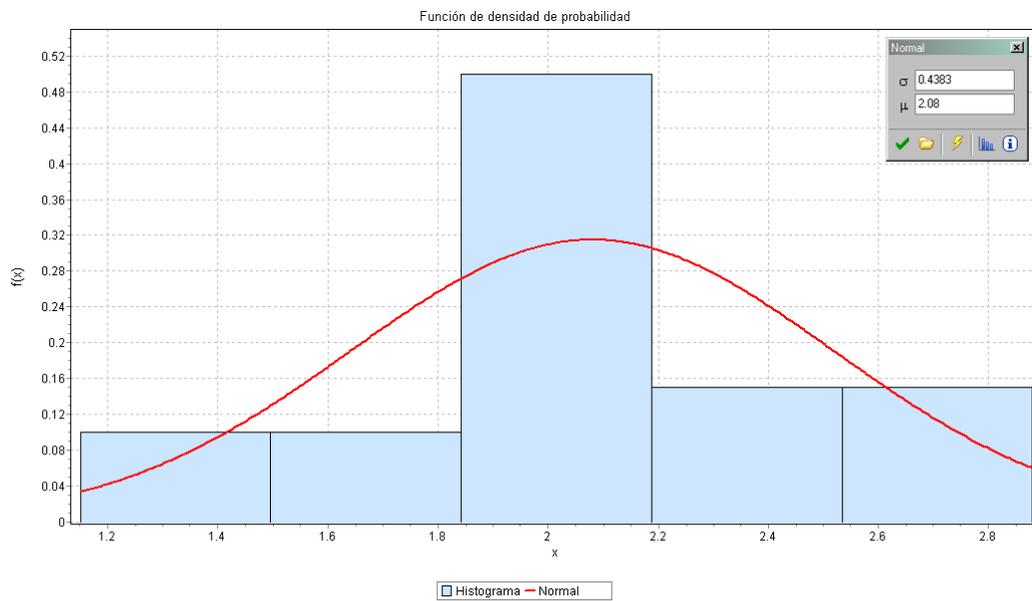


Figura 4-16: Shotcrete - Función de densidad de probabilidad

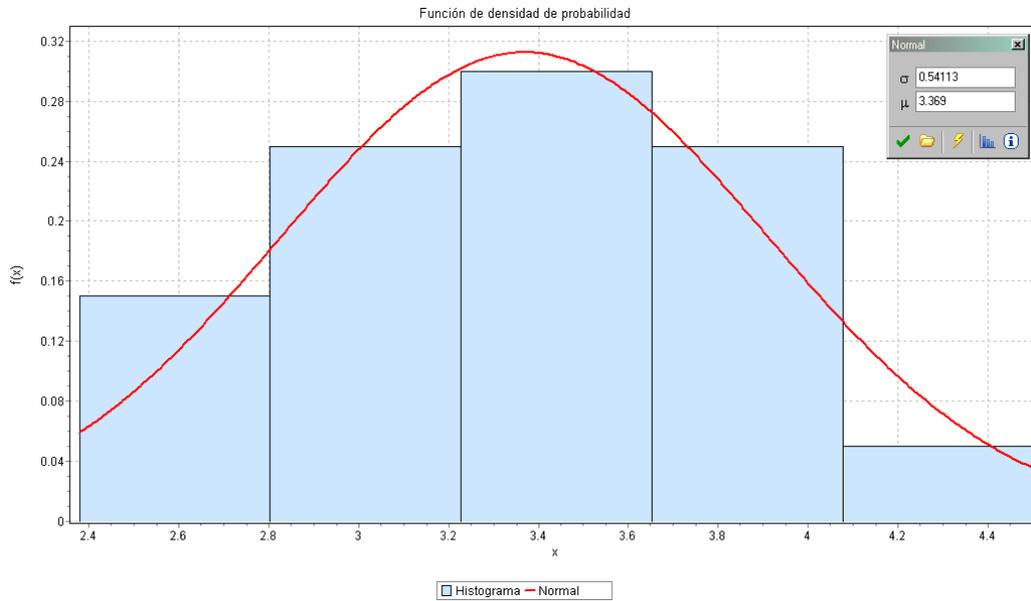


Figura 4-17: Perforación - Función de densidad de probabilidad

El estadístico obtenido para cada caso es el siguiente:

Etapas	Distribución	Estadístico
Marina	Normal	0.224
Fortificación	Normal	0.441
Lechado	Normal	0.204
Malla	Normal	0.464
Hilteo	Normal	0.565
Shotcrete	Normal	0.387
Perforación	Normal	0.139

Finalmente, se consideran los siguientes parámetros para la prueba:

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.5$.
- Valor crítico: 0.752.
- Región crítica: Rechazar H_0 si $A^2 > 0.752$.

Del estadístico es posible concluir que en ningún caso fue posible rechazar la hipótesis H_0 . Es decir, la distribución de los datos puede ser normal.

4.8 Simulación no determinística de eventos discretos

Basándose en el modelo heurístico, y aprovechando su alta velocidad de ejecución, es posible simular varias jornadas incorporando la variabilidad intrínseca de las operaciones unitarias mineras.

Los parámetros considerados para la simulación son:

Etapa	Tiempo medio [h]	Tiempo medio [min]	Desvest [h]	Desvest [min]
Marina	2.52	151	0.83	49.66
Fortificación	2.46	147	0.54	32.22
Lechado	2.12	127	0.67	40.07
Malla	2.25	135	0.60	35.72
Hilteo	2.47	148	0.56	33.37
Shotcrete	2.08	125	0.44	26.34
Perforación	3.37	202	0.54	32.46

Tabla 4-16: Parámetros de distribución para simulaciones

Una distribución normal siempre tendrá la misma “forma básica”. Es la desviación estándar la que define que tan “esparcida” está la distribución.

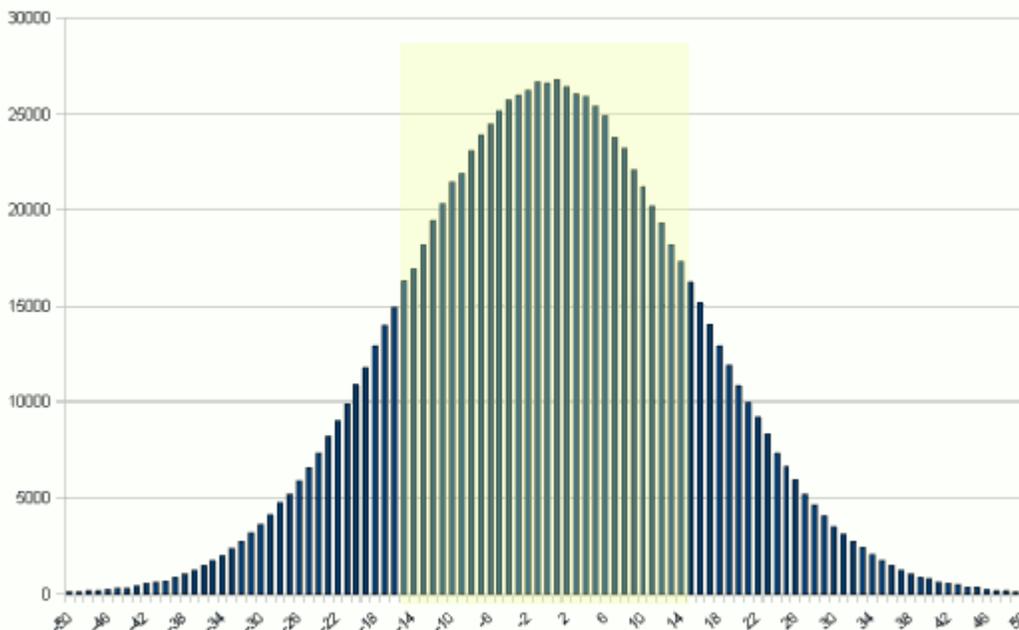


Figura 4-18: Distribución Normal típica

De acuerdo a ello, se tiene que:

- Poco menos del 70% de los casos tenderá a tener un valor dentro de una desviación estándar hacia ambos lados del promedio.
- Poco menos del 90% de los casos tenderá a tener un valor dentro de dos desviaciones estándar hacia ambos lados del promedio.
- Más del 99% de los casos tenderá a tener un valor dentro de tres desviaciones estándar hacia ambos lados del promedio.

Para fines prácticos, se restringen los valores a un rango de dos desviaciones estándar hacia ambos lados del promedio. Considerando de esta forma cerca del 90% de los casos y evitando valores de tiempos de ciclo negativos.

Ciertamente nadie planifica una falla de equipo durante su jornada. Pero incorporar la disponibilidad mecánica en un análisis a largo plazo si tiene sentido.

Equipo	Etapa	DM
E332	Marina	87.50%
E339	Marina	92.88%
E340	Marina	95.83%
E123	Fortificación	92.36%
E138	Fortificación	88.26%
E145	Fortificación	95.31%
E265A	Lechado	96.67%
E266A	Lechado	94.21%
E267A	Malla	96.79%
E268A	Malla	86.67%
E271A	Hilteo	96.59%
E272A	Hilteo	93.75%
E646	Shotcrete	78.70%
EA35	Shotcrete	94.07%
E148	Perforación	96.13%
E156	Perforación	88.96%
E161EA	Perforación	87.04%

Tabla 4-17: Disponibilidad mecánica de equipos

La disponibilidad mecánica no se incorpora como un multiplicador del tiempo de ciclo. Esta simplificación es adecuada para el dimensionamiento de flotas, pero en una simulación interesa conocer el tiempo efectivo en que el equipo estuvo con falla, y no sólo en qué porcentaje aumentó el ciclo de trabajo.

Se asume que el equipo falla un cierto tiempo luego de completar un ciclo en relación a su disponibilidad mecánica en particular. Se tiene:

$$(t_{trabajo} + t_{falla}) \times DM = t_{trabajo}$$
$$t_{falla} \times DM = t_{trabajo} - t_{trabajo} \times DM$$
$$t_{falla} = \frac{t_{trabajo}(1 - DM)}{DM}$$

Donde

t_{falla} : Tiempo en que el equipo se encuentra en falla.

$t_{trabajo}$: Tiempo en que el equipo se encuentra trabajando.

DM : Disponibilidad mecánica.

De esta forma es posible estudiar el plan de corto plazo y el actuar del Jefe de Turno al incorporar más frentes al programa con una mejor aproximación a la realidad. Además de conocer el tiempo efectivo de falla y qué porcentaje de la jornada representa.

Las simulaciones contemplan los siguientes parámetros:

- Horizonte temporal a simular: 30 días.
- Número de simulaciones por escenario: 10.000.
- Variable de entrada: Número de frentes disponibles para trabajar.
- Número de escenarios a simular: 31.

Supuestos adicionales:

- La condición final de un día es la condición inicial del siguiente.

4.9 Ejecución de la simulación

De la simulación de eventos discretos, se analiza cuál es el impacto en el aumento del número de frentes disponibles sobre la productividad diaria. El rango definido para el número de frentes disponibles va de 10 a 40, cercano al número de labores presentes en el plan trimestral de avance a la fecha que contemplaba 37. . De esta forma se abarcan las 14 frentes diarias estipuladas en el programa de corto plazo, las 21 del Jefe de Turno y todas las que admite el plan trimestral.

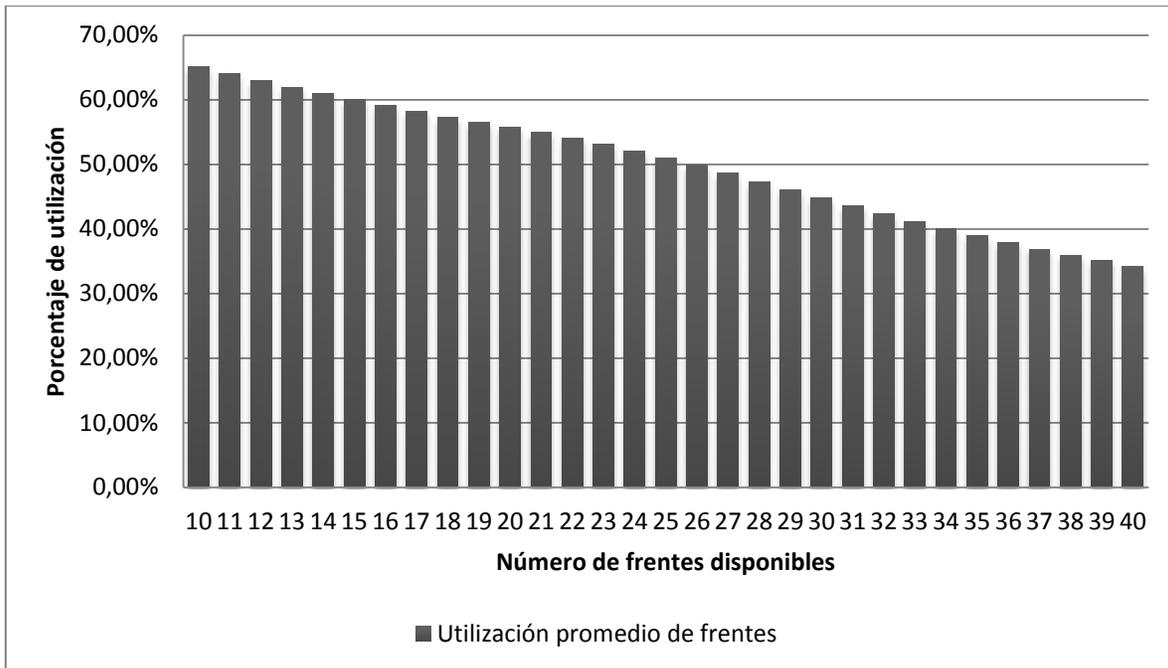


Figura 4-19: Utilización promedio de frentes.

De las simulaciones se obtiene que la utilización promedio de las frentes disminuye al aumentar la variable de entrada, el número de frentes disponibles. Este resultado es lógico, pues se está diversificando la operación y la utilización decrece proporcionalmente con el aumento en el número de frentes disponibles. Este resultado puede llevar equívocamente a pensar que se está realizando una menor cantidad de trabajo si no se toma en cuenta que es un promedio y el número de frentes disponibles va en aumento. Pero por otro lado, la utilización promedio de los equipos demuestra lo contrario:

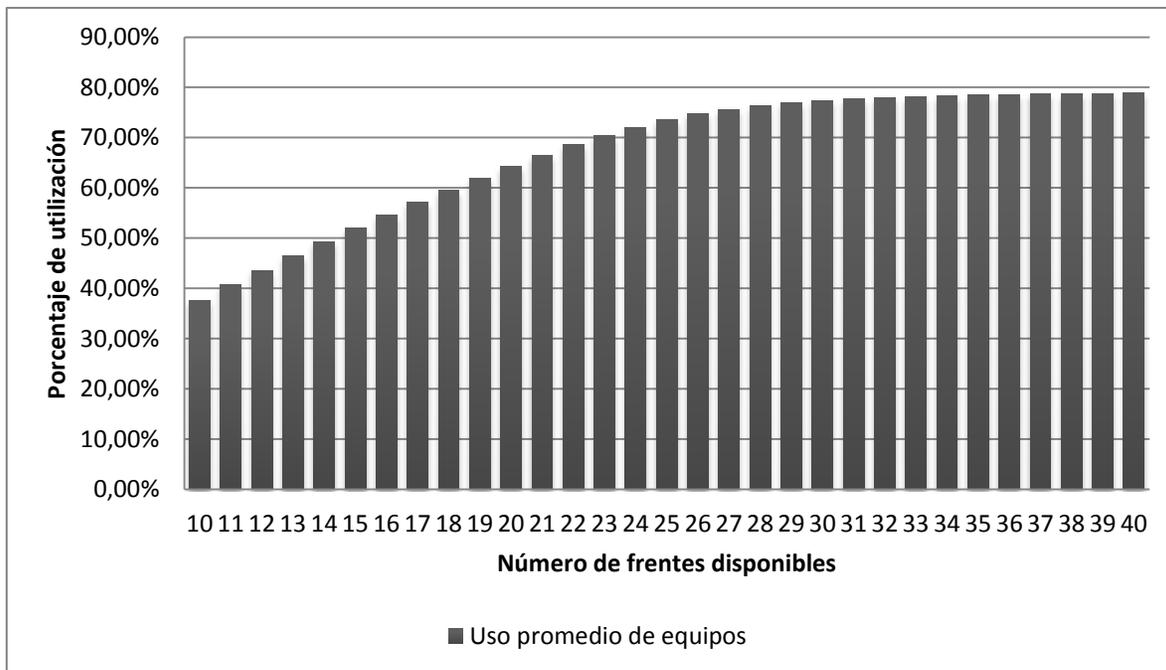


Figura 4-20: Utilización promedio de equipos en simulaciones.

Se observa que el crecimiento es prácticamente constante en un comienzo. Llegando a un punto en que este disminuye y finalmente se estanca. Este resultado es consecuente con la capacidad máxima de trabajo que se tiene según la actual flota de equipos. Por mucho que el número de frentes disponibles siga aumentando, los equipos seguirán siendo los mismos y no habrá una mejora importante si estos ya han alcanzado el máximo de utilización.

Finalmente, el tiempo que los equipos pasan en falla crece de la misma manera que aumenta la utilización, pues el tiempo de falla es proporcional al tiempo trabajado.

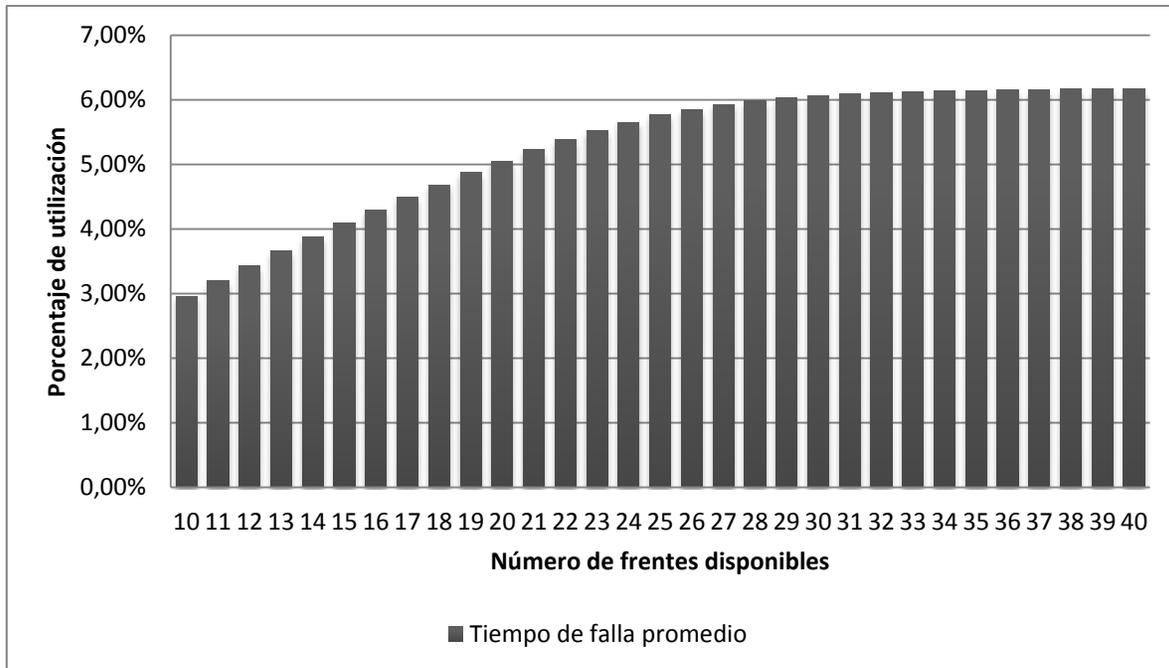


Figura 4-21: Tiempo de falla promedio de equipos en simulaciones.

Estos resultados se aprecian de mejor manera si se utiliza el mismo indicador que se usó para comparar la gestión de equipos en el día por el jefe de turno. El número de frentes equivalentes que se trabajan a diario aumenta sustancialmente con el número de frentes disponibles con que se cuenta. Nuevamente, este resultado llega a un punto en que el crecimiento se estanca y no hay gran diferencia al sumar más frentes.

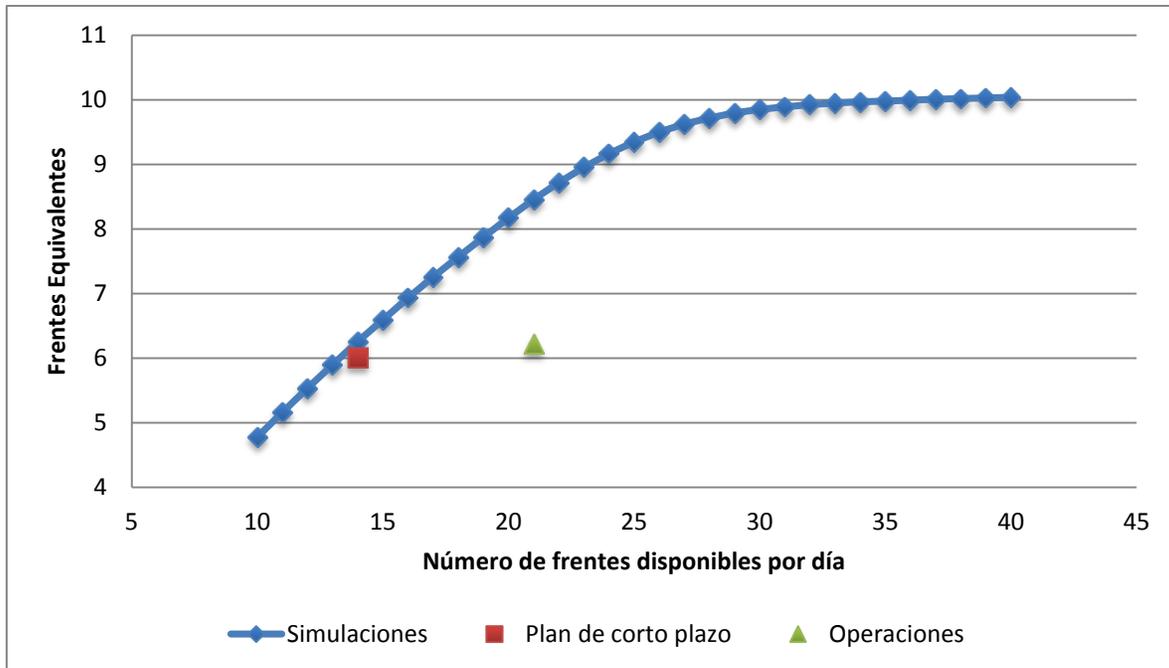


Figura 4-22: Comparación de resultados en Frentes Equivalente.

En el gráfico además se agregaron los puntos en que se sitúa el plan de corto plazo. Donde se pretende completar 6 frentes al día con un abanico de posibilidades de trabajo de 14 frentes en total. También se observa el punto donde se sitúan los Jefes de Turno, quienes trabajan hasta 21 frentes a diario. El resultado obtenido en esta jornada es superior al mínimo exigido según la planificación, pero es bastante inferior a lo que es posible realizar con ese número de frentes o con más.

Es importante destacar que estas simulaciones contemplan una jornada productiva de sólo 13 horas diarias. Es decir, no se está incorporando el ahorro de tiempo que implica la sistematización del proceso de nombradas.

Sólo con fines académicos se determinará alrededor de qué cantidad de frentes disponibles el número de Frentes Equivalentes converge, pero del gráfico anterior se observa que al alcanzar las 40 frentes disponibles el crecimiento marginal ya es tan pequeño como 0.1%.

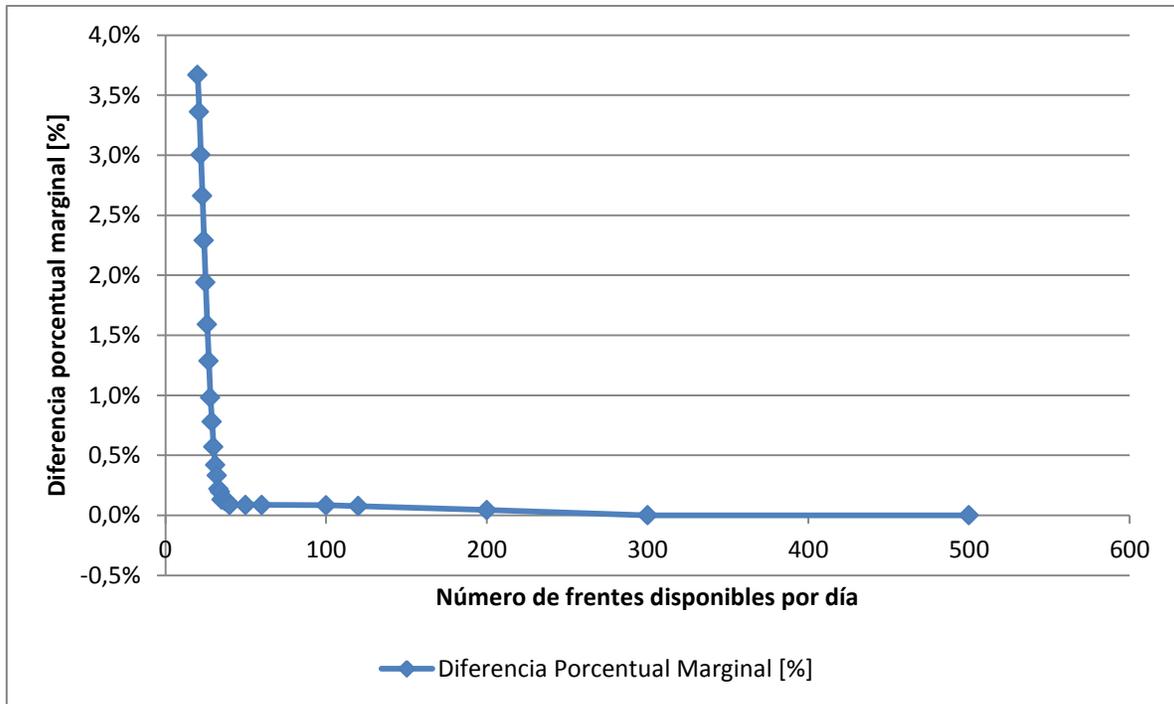


Figura 4-23: Convergencia de Frentes Equivalentes

Al alcanzar las 300 frentes disponibles ya se aprecia una diferencia porcentual negativa. Es decir, ya no hay mejora alguna y la diferencia más bien puede ser atribuida al proceso estocástico de la simulación.

Un número de 28 frentes es suficiente para que la mejora marginal, en Frentes Equivalentes, al agregar una frente disponibles más ya sea menor al 1%.

Número de frentes disponibles por día	Frentes Equivalentes	Tiempo de Ejecución [ms]	Diferencia de Frentes Equivalentes	Diferencia Porcentual Marginal [%]
30	9.8502	282257	0.0561	0.57042%
31	9.8916	343144	0.0414	0.41933%
32	9.9245	324832	0.0328	0.33100%
33	9.9464	430335	0.0219	0.22056%
34	9.9660	345138	0.0196	0.19684%
35	9.9790	364435	0.0129	0.12983%
36	9.9934	330062	0.0144	0.14437%
37	10.0056	351428	0.0121	0.12122%
38	10.0170	333538	0.0114	0.11479%
39	10.0280	384279	0.0109	0.10947%
40	10.0366	371728	0.0085	0.08503%
50	10.1241	451051	0.0874	0.08642%
60	10.2117	649826	0.0876	0.08588%
100	10.5664	735530	0.3546	0.08390%
120	10.7332	781394	0.1667	0.07769%
200	11.1220	968921	0.3888	0.04371%
300	11.1219	1671435	-0.0001	-0.00001%
500	11.1248	3760697	0.0029	0.00013%

Tabla 4-18: Convergencia de Frentes Equivalentes

El valor de convergencia en Frentes Equivalentes corresponde a 11.12. Es decir, dado los recursos con que se dispone en la obra y la disponibilidad mecánica de sus equipos, ese es el máximo al que se puede aspirar como rendimiento promedio.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Tiempos de operación

La utilización promedio de los equipos durante el ciclo de trabajo puede llegar a ser tan alta como el 70% si la gestión de recursos se realiza de forma apropiada. Este trabajo no tiene como objetivo el optimizar los tiempos de las distintas operaciones unitarias, sino que asume la duración de cada etapa como dada y se enfoca en minimizar las pérdidas de tiempo a lo largo de la jornada.

Los tiempos de operación del caso de estudio no pueden obtenerse de la información que manejan las áreas de maquinaria ni operaciones, pues el registro es sumamente incompleto al depender de lo que aportan los operadores de los equipos. Sin embargo, puede estimarse usando el tiempo de ciclo promedio de cada una de las etapas, de acuerdo a los trabajos completados en el turno.

Por otro lado, todos los modelos de asignación aportan de forma directa los tiempos de operación para cada uno de los equipos involucrados. La comparación obtenida sumando el total de minutos de operación se resume en la siguiente tabla:

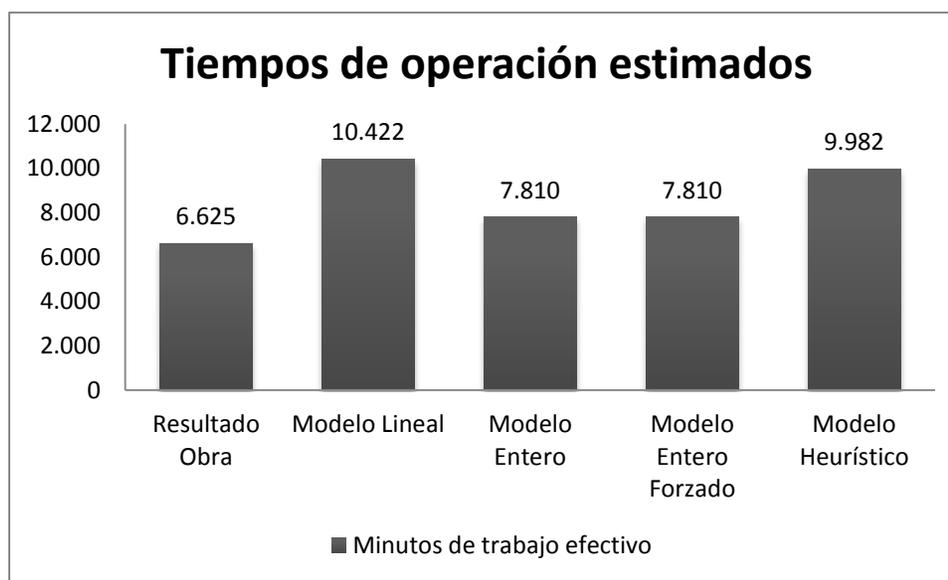


Gráfico 5-1: Tiempos de operación estimados para los distintos modelos

Del gráfico se tiene que el aumento en la cantidad total trabajada, en comparación al resultado de obra, es consecuente con un aumento en el tiempo de trabajo efectivo del turno.

5.2 Tiempo de asignación

Un factor no considerado corresponde al tiempo que tarda el Jefe de Turno en planificar su jornada. En promedio se estima en 42 minutos desde que los trabajadores llegan a las instalaciones en faena hasta que se les entregan las indicaciones del trabajo a realizar. Considerando que esta espera se da dos veces al día, una vez en cada turno, se tiene un tiempo potencial de mejora de 84 minutos diariamente.

El tiempo efectivo del turno es de 6.5 horas. Es decir, un 10.8% del tiempo potencial de trabajo de la jornada se usa ocupa en la nombrada. La reducción potencial de tiempo usado en esta etapa podría permitir aumentar en un 10.8% el tiempo disponible para trabajar y en un orden similar el avance diario.

Del caso real, el resultado que puede obtenerse es el siguiente:

- Tiempo de ejecución: 15 milisegundos
- Períodos para completar una frente: 1064 períodos
- Períodos trabajados: 10889 períodos
- Frentes equivalentes: 10.234 frentes

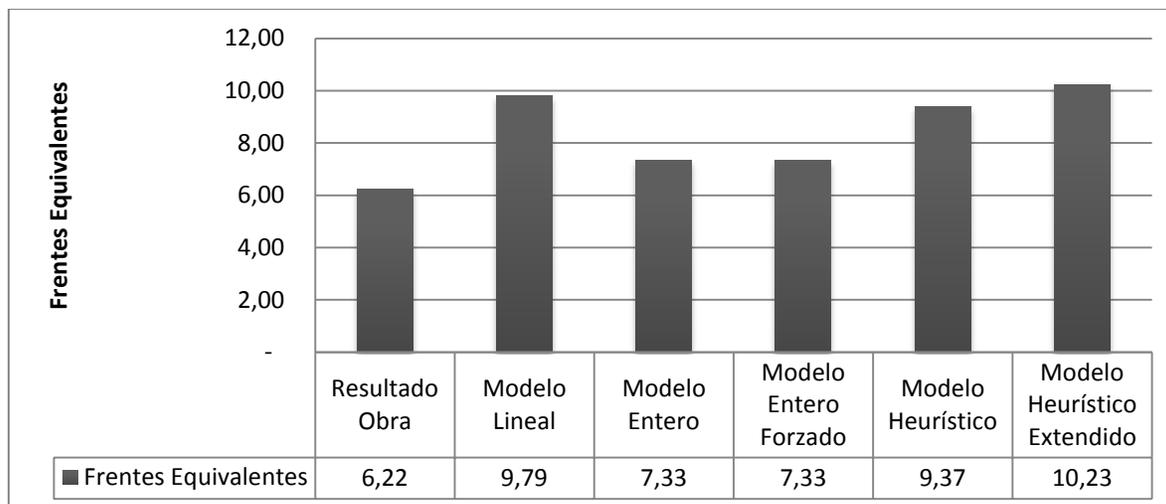


Figura 5-1: Comparación de resultados y ejecución del Jefe de Turno

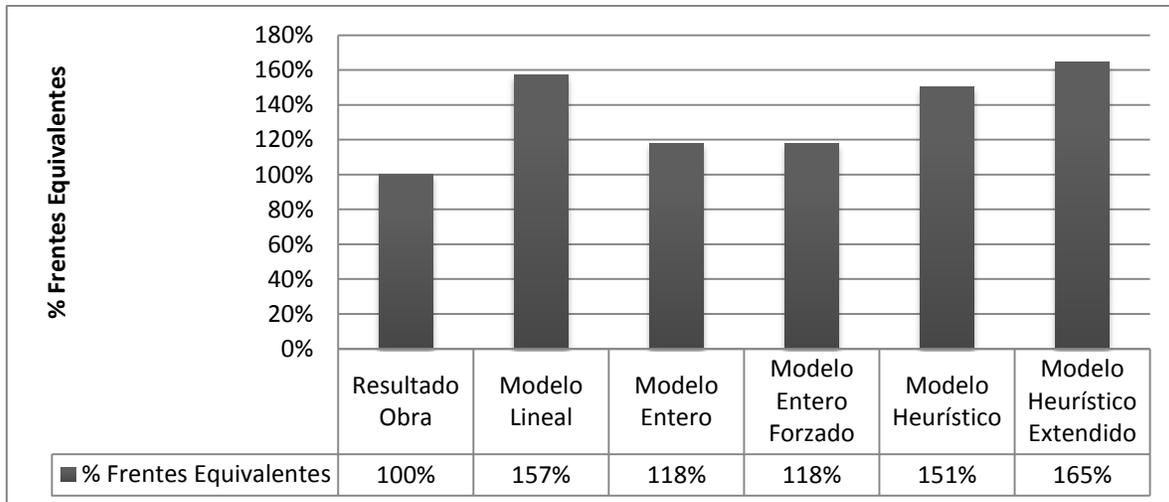


Figura 5-2: Comparación porcentual de resultados y ejecución del Jefe de Turno

Estos resultados no sólo aportan una herramienta de planificación rápida y eficaz al Jefe de Turno, sino que también permiten a todos los trabajadores conocer la ubicación de todos sus compañeros a lo largo del turno. Actividades como la instalación de servicios o el movimiento de camiones mixer también pueden ser mejor distribuidas si se conoce el tiempo esperado de instalación y trabajo de sus equipos dependientes.

5.3 Confianza de la asignación y disponibilidad mecánica

Sobre el caso real operacional, con 21 frentes disponibles y sin agregar los minutos de planificación a la jornada como tiempo útil, pero con condiciones iniciales aleatorias, se realizan 800.000 simulaciones de 1 día. Si el tamaño de las muestras es lo suficientemente grande, la distribución de medias muestrales es, prácticamente, una distribución normal. Sobre el resultado de frentes equivalentes (abscisa) se tiene la siguiente distribución:

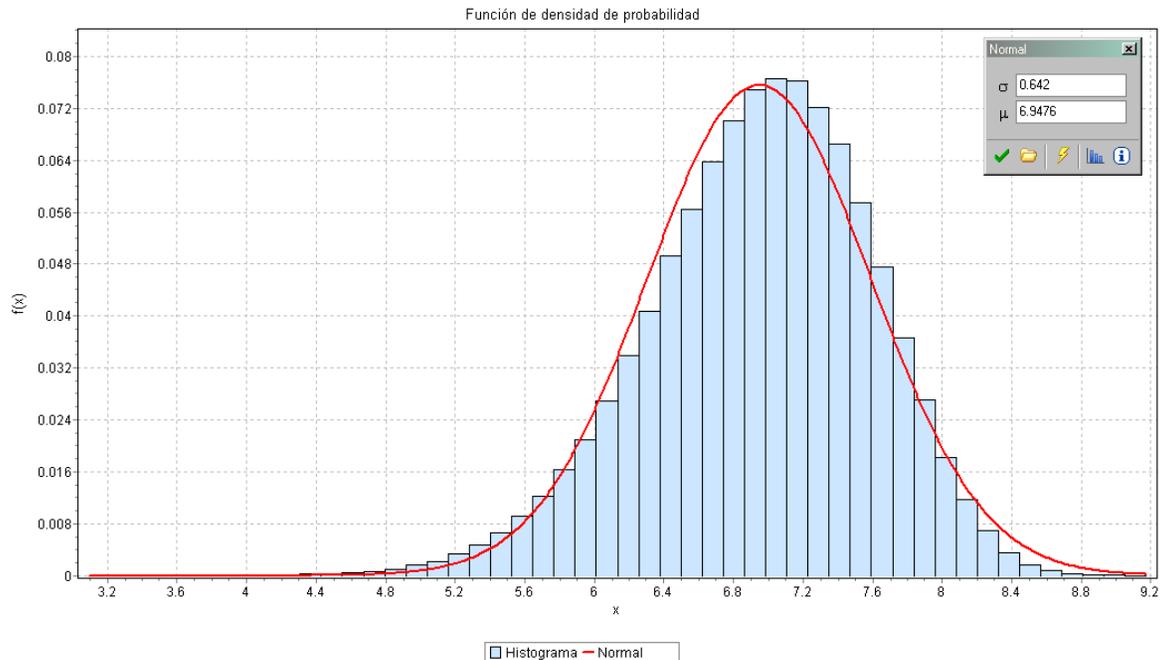


Figura 5-3: Función densidad de probabilidad. 21 Frentes Disponibles.

Para la muestra se tienen las siguientes estadísticas básicas:

Máximo	9.17
Mínimo	3.09
Media	6.95
Desvest	0.64

Tabla 5-1: Estadísticas básicas. 21 Frentes Disponibles.

En una distribución $Z \sim N(0,1)$ puede calcularse un intervalo dentro del cual caigan un determinado porcentaje de las observaciones. Es sencillo hallar z_1 y z_2 tales que $P[z_1 \leq z \leq z_2] = 1 - \alpha$, donde $(1 - \alpha) \times 100$ es el porcentaje deseado.

Para el caso anterior, y usando la tabla de la distribución normal (Anexo A), se tiene la siguiente probabilidad de que el resultado en Frentes Equivalentes sea menor o igual al valor indicado:

z0	FrEq >=	Probabilidad
-2.32	5.46	99%
-1.96	5.69	98%
-1.64	5.89	95%
-1.28	6.13	90%
-0.84	6.41	80%
-0.52	6.61	70%
-0.25	6.79	60%
0	6.95	50%
0.25	7.11	40%
0.52	7.28	30%
0.84	7.49	20%
1.28	7.77	10%
1.64	8.00	5%
1.96	8.21	2.5%
2.32	8.44	1%

Tabla 5-2: Intervalos de confianza. 21 Frentes Disponibles.

Variando el número de frentes disponibles y la disponibilidad mecánica promedio de los equipos se realiza el mismo análisis. Los resultados se detallan en el Anexo B.

Los resultados de los 9 escenarios se resumen en las siguientes tablas:

Frentes Disponibles	Disponibilidad Mecánica		
	70%	80%	90%
20	4.86	5.13	5.35
25	5.66	6	6.29
30	6.22	6.62	7.54

Tabla 5-3: Resultado de Frentes Equivalentes con una confianza del 99%

Frentes Disponibles	Disponibilidad Mecánica		
	70%	80%	90%
20	5.4	5.73	6.01
25	6.17	6.56	6.9
30	6.71	7.15	7.54

Tabla 5-4: Resultado de Frentes Equivalentes con una confianza del 90%

Frentes Disponibles	Disponibilidad Mecánica		
	70%	80%	90%
20	6.08	6.47	6.82
25	6.8	7.25	7.66
30	7.33	7.8	8.24

Tabla 5-5: Resultado de Frentes Equivalentes con una confianza del 50%

Con una tolerancia del 5%, se categorizan como aceptables, en amarillo, aquellos casos en que se cumple la planificación. Verdes aquellos en que se supera y rojos aquellos en que no se alcanza.

Estos últimos resultados indican que, bajo esta metodología, en ninguno de los casos estudiados podría darse que en promedio no se cumpla la planificación. Incluso con una disponibilidad mecánica del 70%, un escenario muy pesimista, existen alternativas para cumplir con el plan hasta con un 99% de confianza sólo diversificando la operación.

Se entrega una interfaz gráfica simple, multiplataforma, para el uso de esta herramienta de asignación al departamento de operaciones (Anexo C).

5.4 Comportamiento en escenarios genéricos

A fin de comprobar la eficacia de la asignación y obviar el sesgo producido del análisis sobre el caso base, se decide poner a prueba los distintos modelos en 10 escenarios cuyas condiciones iniciales para las frentes de trabajo se obtuvieron utilizando un algoritmo de generación pseudo-aleatoria de números enteros, derivado del ruido atmosférico.

Se utilizó un escenario con 20 frentes disponibles para operar y una dotación de maquinaria análoga a la presentada anteriormente. Las condiciones iniciales generadas son las siguientes:

FRENTE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
CASO 1	1	6	7	1	3	7	3	2	4	6	5	3	6	1	4	6	4	4	7	3
CASO 2	7	7	5	1	4	5	7	3	5	7	6	6	6	1	7	5	1	2	4	7
CASO 3	3	4	1	1	1	2	4	7	6	3	7	5	2	6	7	6	1	7	1	7
CASO 4	5	6	6	3	5	7	1	6	2	1	3	3	6	7	5	4	5	1	7	5
CASO 5	3	5	4	3	3	2	2	3	3	7	1	5	7	4	1	1	6	3	7	5
CASO 6	4	4	7	5	6	5	7	3	2	4	3	2	6	3	5	5	6	3	7	1
CASO 7	5	7	1	2	7	7	1	5	3	1	2	3	7	2	6	2	2	6	7	2
CASO 8	5	3	4	4	2	3	5	7	7	2	1	6	5	4	4	4	2	6	7	3
CASO 9	1	3	6	3	5	2	1	6	2	7	7	2	5	2	7	5	6	2	1	4
CASO 10	2	6	4	5	1	7	1	7	1	2	5	2	7	6	2	5	4	7	5	2

Tabla 5-6: Condiciones iniciales aleatorias para las frentes de trabajo

Donde cada número representa la etapa del ciclo a realizar a continuación:

- 1: Marina
- 2: Fortificación.
- 3: Lechado.
- 4: Malla.
- 5: Hilteo.
- 6: Shotcrete.
- 7: Perforación.

Los algoritmos trabajaron bajo las mismas condiciones que en el caso de estudio. Es decir, el modelo lineal sobre 54 períodos, y los modelos enteros en 10 períodos. Mientras que el modelo heurístico trabajó con precisión de minutos, teniendo un total de 780 períodos. Para el total de escenarios ejecutados, se obtienen los siguientes resultados:

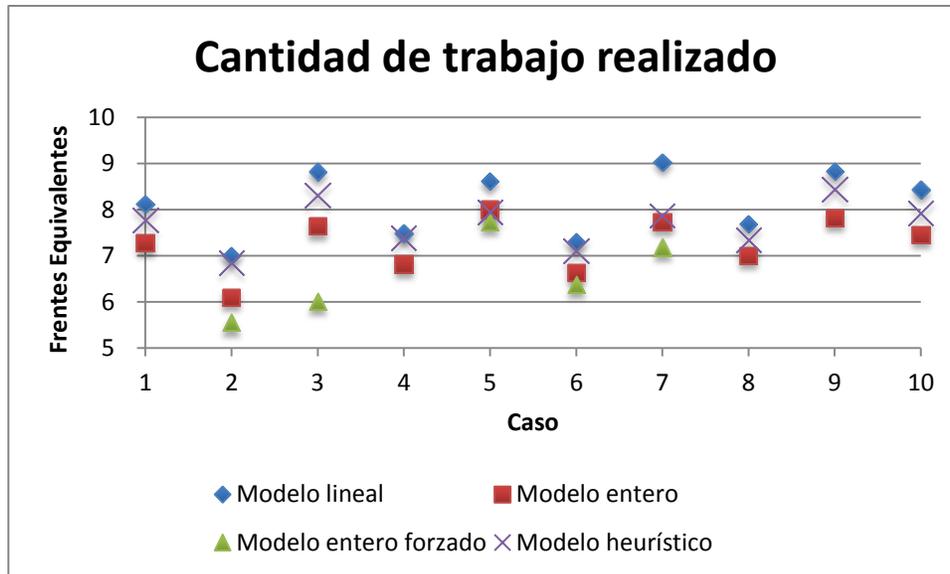


Gráfico 5-2: Cantidad de trabajo realizado en escenarios aleatorios

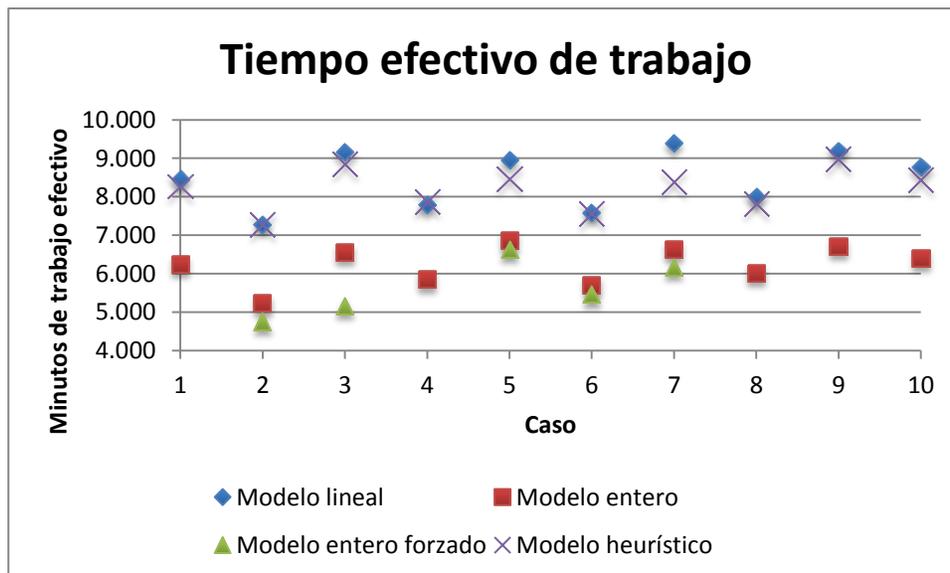


Gráfico 5-3: Tiempo efectivo de trabajo en escenarios aleatorios

Los resultados obtenidos presentan una relación similar, entre un modelo y otro, a la obtenida trabajando sobre el caso base. El modelo lineal resulta ser siempre superior, al entregar soluciones fraccionarias que no son aplicables a la realidad. Le sigue el modelo heurístico, que a pesar de no entregar soluciones óptimas tiene la ventaja de poder trabajar en períodos de tiempo muy pequeños. Luego está el modelo entero, cuyos resultados se ven agravados a causa de la pequeña cantidad de períodos con que se trabaja y todas las

aproximaciones a enteros que esto implica. Finalmente está el modelo entero forzado, cuyos resultados siempre serán inferiores a los del modelo entero, y en algunos casos el algoritmo no es capaz de hallar una solución factible, entregando una solución vacía (cero).

El resultado nos indica que los modelos planteados poseen validez fuera del caso de estudio. Debido a la forma en que fue planteado el problema, estos debiesen ser capaces de funcionar bajo cualquier escenario que cumpla los requisitos presentados a comienzos de este trabajo, siendo aptos para resolver cualquier caso que pueda presentarse en la realidad operacional de la obra.

6. CONCLUSIONES

Luego de desarrollar el algoritmo propuesto inicialmente, puede concluirse que la actual metodología de trabajo de los Jefes de Turno es muy cuestionable en términos de eficiencia en la asignación de los recursos disponibles. Sus herramientas de planificación siguen siendo papel, lápiz y su experiencia en la labor, estando en una era en que las tecnologías de información y sistemas computacionales son de fácil acceso para todos. La asignación de equipos que se realiza no sólo es ineficiente, sino que resta un tiempo excesivo de trabajo al personal.

Si bien los patrones de trabajo actuales siguen cierta lógica básica, es fácil de mejorar teniendo en cuenta que la realidad operacional consta de diversas operaciones unitarias, con maquinaria muy disímil, las cuales tienen una evidente diferencia en cuanto a ritmos de trabajo. Tomando en cuenta lo anterior, de entre las cuatro metodologías estudiadas para abordar el problema, la más apropiada es el modelo heurístico que adopta algunos de los patrones básicos que sigue el Jefe de Turno. Si bien entrega un resultado sub-óptimo, es el que se resuelve más rápidamente, entrega soluciones factibles y asegura la existencia de una solución para cualquier caso. Por otro lado, su diferencia respecto al modelo lineal indica que la solución no dista mucho del óptimo matemático, y aún es muy superior al resultado obtenido en obra.

Los resultados indican que el número de frentes contemplados según programa son insuficientes para maximizar la utilización de los equipos. Este número probablemente fue definido durante las etapas tempranas de ingeniería del proyecto, durante su estudio y evaluación. Pero dado el número actual de equipos y rendimientos exigidos, el programa a mediano plazo no contribuye a maximizar la producción. La decisión del jefe de turno de trabajar otros sectores adicionales es correcta, pues no sólo aumenta la utilización de los equipos y el número de metros lineales a obtenerse mensualmente, sino que también permite diversificar la operación y tener más alternativas a comienzo de turno para la asignación de labores. Sin embargo este número sigue siendo insuficiente. Esmeralda es un sector lo suficientemente grande como para tener labores activas en más de 30 puntos a la vez.

La información recopilada acerca de los tiempos de ciclo para cada una de las operaciones unitarias presenta una muy alta variabilidad. Ello tiene directa implicancia sobre la confiabilidad de los planes que pueden ser generados a partir de dichos datos. Es razonable esperar que en promedio los rendimientos sean similares a lo estudiado en el levantamiento. Sin embargo, llevándolo al nivel operacional diario, es necesario tener un mayor grado de certeza al gestionar los recursos. Se recomienda aumentar el número de

datos para cada operación unitaria para tener una aproximación más confiable de la distribución que siguen los tiempos de ciclo.

La toma de datos incorpora todas las actividades de apoyo (carga de combustible, materiales, traslados, etc.) dentro del ciclo de cada operación unitaria. Sin embargo, actividades que no se realizan siempre sería mejor considerarlas de manera independiente para ser incorporadas en una simulación como actividad complementaria y no como parte del ciclo propiamente tal. Por ejemplo, es posible estimar después de cuántas horas de operación es necesario llenar de petróleo el estanque de un equipo para que no se quede sin combustible y e incorporarlo en la simulación.

En términos económicos, se tiene una mejora potencial de la productividad en hasta un 65% sin ninguna inversión adicional en recursos como maquinaria o mano de obra, sólo mejorando la gestión que actualmente se hace. Por otro lado, los ingresos de la obra por concepto de desarrollos horizontales podrían aumentar en un porcentaje mucho mayor. Todos los costos fijos ya están cubiertos y el trabajo adicional a realizarse sólo incorporaría un aumento en los costos variables proporcional al trabajo realizado.

La metodología propuesta puede significar una nueva forma de abordar la gestión de recursos en la construcción de desarrollos horizontales, ya que soluciona la problemática que enfrenta el Jefe de Turno a diario al trabajar con múltiples frentes de preparación minera y equipos de diversa índole. Este enfoque promete un aumento en la efectividad y eficiencia de la operación, además un aumento sustancial del tiempo efectivo de trabajo del que se dispone en el turno.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados de este trabajo son consecuentes con la forma de operar de una empresa contratista. Si bien el plan mensual y semanal es entregado por el mandante, el orden de la ejecución de los labores para un día en específico es irrelevante, pues las distintas labores tienen el mismo valor unitario por metro de avance.

Por otro lado, la asignación realizada a diario contempla sólo la duración del turno. Esto genera discontinuidades en el ciclo de avance y la necesidad de volver a pensar en la asignación de labores cada vez que ocurren cambios en los grupos de trabajo. En lugar de ello, operaciones debiese trabajar enfocándose en el plan diario, y no en un turno en particular.

Un resultado más exacto de la planificación podría obtenerse incorporando las distancias de traslado entre puntos y las actividades auxiliares que se incluyen dentro del tiempo de ciclo. Si bien el tiempo que tardan las operaciones unitarias en agregar valor tiene poca variabilidad respecto a esta variable, son las actividades de apoyo las que si se ven directamente afectadas. Por ejemplo, la búsqueda de materiales.

Teniendo conocimiento de la ubicación de la bodega y la frente de trabajo, es posible estimar el tiempo que tardará una cuadrilla en alimentarse de materiales para completar su labor. Incorporar esta variable invalida el supuesto de todos los modelos que asumen equivalencia entre trabajar una frente u otra, pues ahora la distancia creará diferencias entre el tiempo total de ciclo entre las distintas frentes.

Si bien el modelo propuesto sin duda implica una potencial mejora operacional, este sistema es perfectible en muchos aspectos. Alguno de los puntos que aquí no se han considerado corresponden a:

- El tiempo específico de traslado relativo a la ubicación del equipo y la frente. Este punto además admite la optimización de rutas través de las cuales se desplaza el personal. Algoritmos, como el de Dijkstra, son aplicables a un sistema regular de este tipo que es fácil representar en forma de una red con arcos y nodos.
- El abastecimiento de insumos y materiales desde equipos auxiliares hacia los equipos principales (hormigones, combustibles, etc). Asumir la disponibilidad total e inmediata es un error que se arrastra desde la metodología de trabajo del Jefe de Turno. Si bien este punto no depende directamente de él, lo ideal sería considerar el sistema completo.

- Los metros lineales de avance. Para el caso de los desarrollos son relevantes al considerar el tiempo que toma completar una operación unitaria. La instalación de pernos, por ejemplo, se realiza espaciada en distancias enteras, de modo que lo ideal sería llevar un control del metraje de avance. De esta forma se puede obtener una aproximación mucho más certera que la del promedio o una función lineal.
- Abordar un enfoque multi-etapa, que incorpore más de un modelo. Por ejemplo, aplicar ciertas heurísticas sobre el resultado del modelo lineal para convertirlo en factible o trabajar sobre su óptimo como base.
- Cambiar el software que aportaba con la resolución del problema. GLPK está muy por debajo de las alternativas comerciales. Utilizando una herramienta más potente es posible alcanzar mejores resultados en menos tiempo.

La implementación es una etapa posterior que no está contemplada en este trabajo. Cualquier innovación que involucre la obra puede verse seriamente retrasado por un sinnúmero de factores externos difíciles de predecir, según argumentan los expertos de la contratista. Debe realizarse un análisis respecto a la confiabilidad del modelo desarrollado, su aplicabilidad, y su impacto en la operación misma de la faena.

Finalmente, un grave error en que se incurre en la faena es evaluar a los Jefes de Turno por el número de metros de avance y el número de frentes listas para tronar al turno siguiente. Si bien es cierto que es la tronadura la que permite empezar nuevamente el ciclo de avance, no todos los equipos cumplen la misma función. No tiene sentido maximizar el número de frentes en un único estado. La operación debe diversificarse y cada etapa del ciclo debe tener una importancia relativa a su aporte en el proceso. Así pueden asignarse de forma activa todos los equipos a comienzo de turno y mantener la continuidad del ciclo de avance.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chacón, Jaime. 1976. “Block Caving y LHD. Reflexiones sobre mallas de extracción”. Revista Minerale N° 134. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile (IIMCH).
- [2] Castro, Raúl. 2011. “Operaciones Unitarias”. Presentación del curso Fundamentos de Tecnología Minera. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- [3] Poblete, Cristian. 2008. “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. Universidad de Chile.
- [4] Alarie, Stéphane & Gamache, Michel. 2002. “Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines”. Taylor & Francis. International Journal of Mining, Reclamation and Environment.
- [5] Subtil, Silva, Alves. 2011. “A Practical Approach to Truck Dispatch for Open Pit Mines”. 35th Apcom Symposium.
- [6] White, J.W. & Olson, J.P. 1986. “Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives”. Mining Engineering. Vols. 183. p1045-1054.
- [5] Caldentey, René & Mondschein, Susana. 1999. “Modelos de Decisión en Ambientes Inciertos”. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Chile.
- [7] Espinoza, Daniel. 2011. “Modelamiento y Optimización”. Presentación del curso IN3701. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Chile.
- [8] Saayman, Craig, Camisani-Calzolari. 2006. “Optimization of an autonomous vehicle dispatch system in an underground Mine”. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.
- [9] Paul Saayman. 2005. “Optimization of an Autonomous Vehicle Dispatch System in an Underground Mine”. Entrega parcial para optar al grado Master en Ingeniería Electrónica. Facultad de Ingeniería, University of Pretoria.
- [10] Mittelman, Hans. “Benchmarks for optimization software”. [en línea]. <http://plato.asu.edu/bench.html>, 2011 [consulta: junio, 2013].

- [11] Bernhard Meindl, Matthias Templ. 2012. "Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems". Department of Statistics and Probability Theory. Essnet Project.
- [12] Fourer, Gay, Kernighan. 2003. "A Modeling Language for Mathematical Programming". Segunda Edición. Duxbury Press .Cole Publishing Company.
- [13] GNU Project. 2013. "GNU Linear Programming Kit Reference Manual". Borrador.
- [14] Bruno, Tomás. 2012. "Instructivo de GLPK". Modelos de Optimización I. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.
- [15] Sottinen, Tommi. 2009. "Operations Research with GNU Linear Programming Kit". University of Vaasa.
- [17] Meyer, Paul. 1986. "Probabilidad y Aplicaciones Estadísticas". Segunda Edición. Departamento de Matemáticas. Washington State University.
- [18] SERNAGEOMIN. 2012. "Anuario de la Minería de Chile". [en línea] http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/anuario/anuario_2012.pdf. [consulta: enero, 2014]
- [19] Cavieres, Patricio. 1999. "Gestión de la Innovación Tecnológica". Programa de Especialización en Innovación Tecnológica Geomecánica y Geotecnia Aplicada a la Minería. Codelco Chile - División El Teniente.
- [20] Gobierno de Chile. 2013. "Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo". [en línea] <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=167766>. [consulta: abril, 2014].
- [21] Vallejos, Javier. 2011. "Estabilización del macizo rocoso". Presentación del curso Mecánica de Rocas. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- [22] Russell, Miles. 2000. "Flint Mines in Neolithic Britain". Tempus. Stroud.
- [23] Lizotte, Bonates, Leclerc. 1987. "Design and Implementation of a Semi-automated Truck/Shovel Dispatching System". APCOM 87. Volume I: Mining. p377-387.

[24] Ercelebi & Bascetin. 2009. "Optimization of shovel-truck system for surface mining". Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol.109. p433-439.

[25] Munirathinam, M & Yingling, J C. 1994. "A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations, International Journal of Surface Mining". Reclamation and Environments- 8:1-15.

[26] A. M. Vershik. 2002. "About L.V.Kantorovich and linear programming". Leonid Vital'evich Kantorovich: a man and a scientist. Izd. SO RAN. Vol. 1. p130-152.

9. ANEXO A

	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	0.500000	0.503989	0.507978	0.511966	0.515953	0.519939	0.523922	0.527903	0.531881	0.535856
0.1	0.539828	0.543795	0.547758	0.551717	0.555670	0.559618	0.563559	0.567495	0.571424	0.575345
0.2	0.579260	0.583166	0.587064	0.590954	0.594835	0.598706	0.602568	0.606420	0.610261	0.614092
0.3	0.617911	0.621720	0.625516	0.629300	0.633072	0.636831	0.640576	0.644309	0.648027	0.651732
0.4	0.655422	0.659097	0.662757	0.666402	0.670031	0.673645	0.677242	0.680822	0.684386	0.687933
0.5	0.691462	0.694974	0.698468	0.701944	0.705401	0.708840	0.712260	0.715661	0.719043	0.722405
0.6	0.725747	0.729069	0.732371	0.735653	0.738914	0.742154	0.745373	0.748571	0.751748	0.754903
0.7	0.758036	0.761148	0.764238	0.767305	0.770350	0.773373	0.776373	0.779350	0.782305	0.785236
0.8	0.788145	0.791030	0.793892	0.796731	0.799546	0.802337	0.805105	0.807850	0.810570	0.813267
0.9	0.815940	0.818589	0.821214	0.823814	0.826391	0.828944	0.831472	0.833977	0.836457	0.838913
1.0	0.841345	0.843752	0.846136	0.848495	0.850830	0.853141	0.855428	0.857690	0.859929	0.862143
1.1	0.864334	0.866500	0.868643	0.870762	0.872857	0.874928	0.876976	0.879000	0.881000	0.882977
1.2	0.884930	0.886861	0.888768	0.890651	0.892512	0.894350	0.896165	0.897958	0.899727	0.901475
1.3	0.903200	0.904902	0.906582	0.908241	0.909877	0.911492	0.913085	0.914657	0.916207	0.917736
1.4	0.919243	0.920730	0.922196	0.923641	0.925066	0.926471	0.927855	0.929219	0.930563	0.931888
1.5	0.933193	0.934478	0.935745	0.936992	0.938220	0.939429	0.940620	0.941792	0.942947	0.944083
1.6	0.945201	0.946301	0.947384	0.948449	0.949497	0.950529	0.951543	0.952540	0.953521	0.954486
1.7	0.955435	0.956367	0.957284	0.958185	0.959070	0.959941	0.960796	0.961636	0.962462	0.963273
1.8	0.964070	0.964852	0.965620	0.966375	0.967116	0.967843	0.968557	0.969258	0.969946	0.970621
1.9	0.971283	0.971933	0.972571	0.973197	0.973810	0.974412	0.975002	0.975581	0.976148	0.976705
2.0	0.977250	0.977784	0.978308	0.978822	0.979325	0.979818	0.980301	0.980774	0.981237	0.981691
2.1	0.982136	0.982571	0.982997	0.983414	0.983823	0.984222	0.984614	0.984997	0.985371	0.985738
2.2	0.986097	0.986447	0.986791	0.987126	0.987455	0.987776	0.988089	0.988396	0.988696	0.988989
2.3	0.989276	0.989556	0.989830	0.990097	0.990358	0.990613	0.990863	0.991106	0.991344	0.991576
2.4	0.991802	0.992024	0.992240	0.992451	0.992656	0.992857	0.993053	0.993244	0.993431	0.993613
2.5	0.993790	0.993963	0.994132	0.994297	0.994457	0.994614	0.994766	0.994915	0.995060	0.995201
2.6	0.995339	0.995473	0.995604	0.995731	0.995855	0.995975	0.996093	0.996207	0.996319	0.996427
2.7	0.996533	0.996636	0.996736	0.996833	0.996928	0.997020	0.997110	0.997197	0.997282	0.997365
2.8	0.997445	0.997523	0.997599	0.997673	0.997744	0.997814	0.997882	0.997948	0.998012	0.998074
2.9	0.998134	0.998193	0.998250	0.998305	0.998359	0.998411	0.998462	0.998511	0.998559	0.998605
3.0	0.998650	0.998694	0.998736	0.998777	0.998817	0.998856	0.998893	0.998930	0.998965	0.998999
3.1	0.999032	0.999065	0.999096	0.999126	0.999155	0.999184	0.999211	0.999238	0.999264	0.999289
3.2	0.999313	0.999336	0.999359	0.999381	0.999402	0.999423	0.999443	0.999462	0.999481	0.999499
3.3	0.999517	0.999534	0.999550	0.999566	0.999581	0.999596	0.999610	0.999624	0.999638	0.999651
3.4	0.999663	0.999675	0.999687	0.999698	0.999709	0.999720	0.999730	0.999740	0.999749	0.999758
3.5	0.999767	0.999776	0.999784	0.999792	0.999800	0.999807	0.999815	0.999822	0.999828	0.999835
3.6	0.999841	0.999847	0.999853	0.999858	0.999864	0.999869	0.999874	0.999879	0.999883	0.999888
3.7	0.999892	0.999896	0.999900	0.999904	0.999908	0.999912	0.999915	0.999918	0.999922	0.999925
3.8	0.999928	0.999931	0.999933	0.999936	0.999938	0.999941	0.999943	0.999946	0.999948	0.999950
3.9	0.999952	0.999954	0.999956	0.999958	0.999959	0.999961	0.999963	0.999964	0.999966	0.999967
4.0	0.999968	0.999970	0.999971	0.999972	0.999973	0.999974	0.999975	0.999976	0.999977	0.999978

Tabla 9-1: Función de distribución de la variable Normal(0,1)

10.ANEXO B

A continuación se detallan las funciones de densidad de probabilidad generadas de las 800.000 simulaciones para cada uno de los 9 escenarios. Luego, una tabla con los intervalos de confianza generados de ajustar los resultados a una distribución normal.

FD corresponde al número de frentes disponibles, y DM a la disponibilidad mecánica promedio de los equipos en los rótulos de gráficos y tablas.

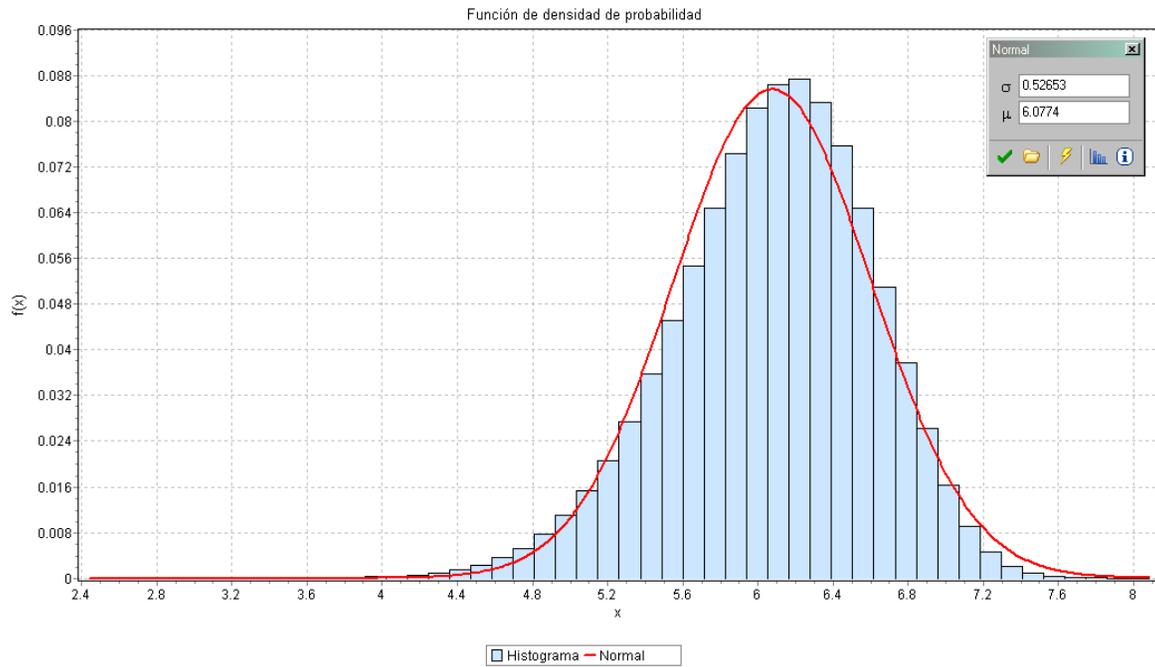


Figura 10-1: Función densidad de probabilidad. 20 FD, DM 70%.

z0	FrEq >=	Probabilidad
-2.32	4.86	99%
-1.96	5.05	98%
-1.64	5.21	95%
-1.28	5.40	90%
-0.84	5.64	80%
-0.52	5.80	70%
-0.25	5.95	60%
0	6.08	50%
0.25	6.21	40%
0.52	6.35	30%
0.84	6.52	20%
1.28	6.75	10%
1.64	6.94	5%
1.96	7.11	2.5%
2.32	7.30	1%

Tabla 10-1: Intervalos de confianza. 20 FD, DM 70%.

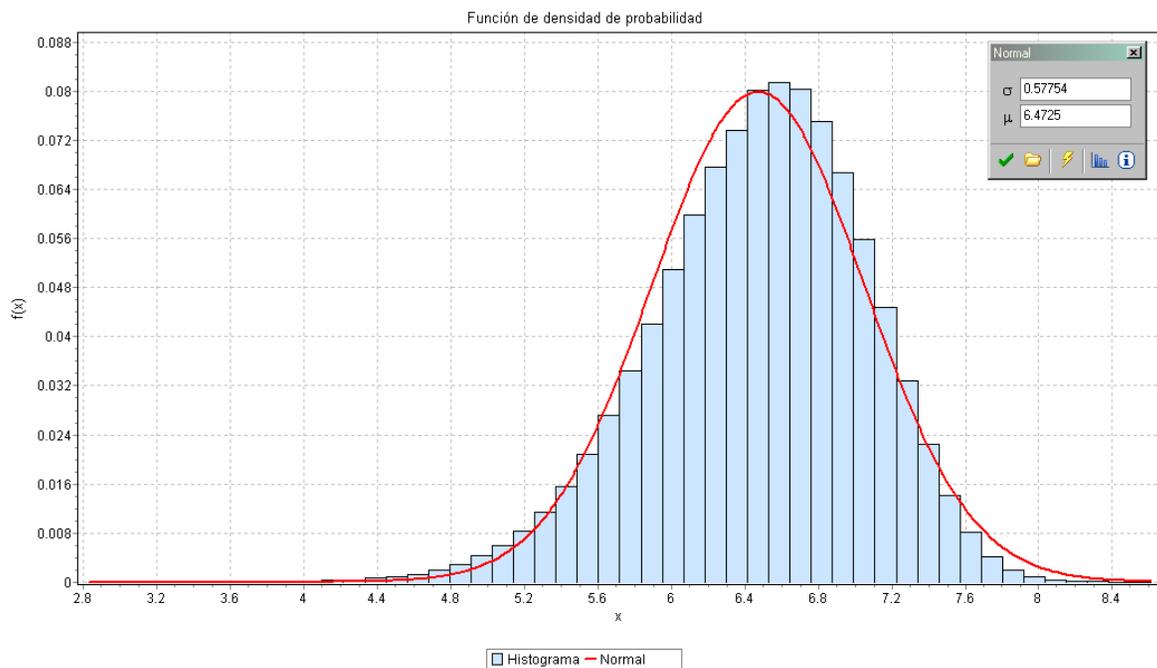


Figura 10-2: Función densidad de probabilidad. 20 FD, DM 80%.

z0	FrEq >=	Probabilidad
-2.32	5.13	99%
-1.96	5.34	98%
-1.64	5.53	95%
-1.28	5.73	90%
-0.84	5.99	80%
-0.52	6.17	70%
-0.25	6.33	60%
0	6.47	50%
0.25	6.62	40%
0.52	6.77	30%
0.84	6.96	20%
1.28	7.21	10%
1.64	7.42	5%
1.96	7.60	2.5%
2.32	7.81	1%

Tabla 10-2: Intervalos de confianza. 20 FD, DM 80%.

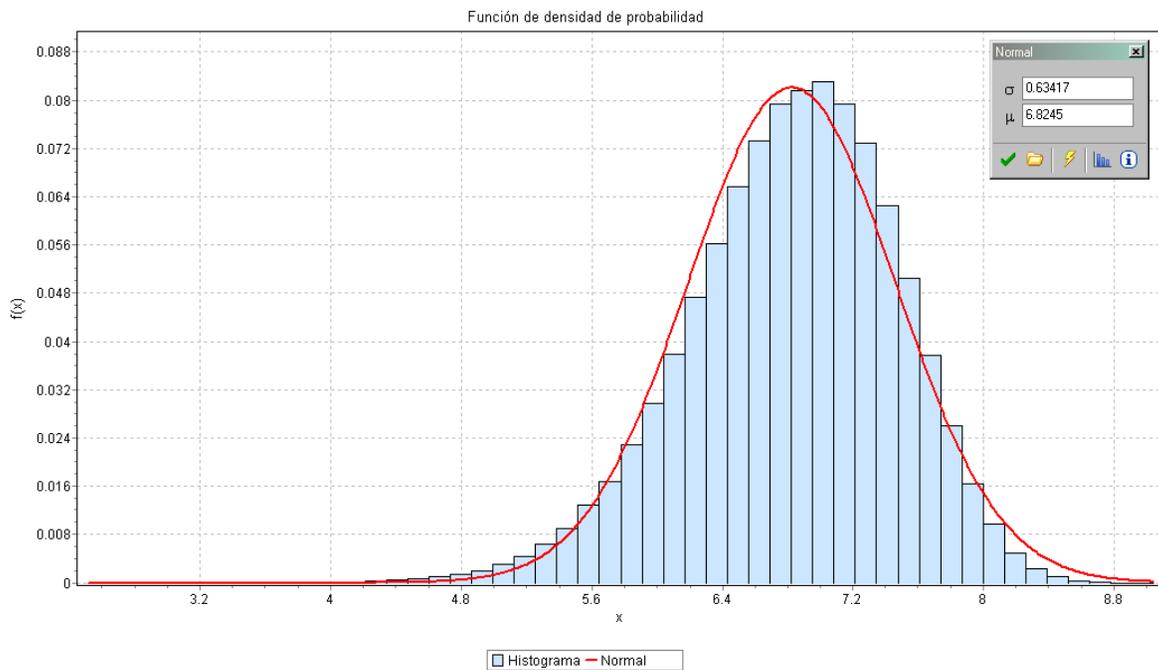


Figura 10-3: Función densidad de probabilidad. 20 FD, DM 90%.

z0	FrEq >=	Probabilidad
-2.32	5.35	99%
-1.96	5.58	98%
-1.64	5.78	95%
-1.28	6.01	90%
-0.84	6.29	80%
-0.52	6.49	70%
-0.25	6.67	60%
0	6.82	50%
0.25	6.98	40%
0.52	7.15	30%
0.84	7.36	20%
1.28	7.64	10%
1.64	7.86	5%
1.96	8.07	2.5%
2.32	8.30	1%

Tabla 10-3: Intervalos de confianza. 20 FD, DM 90%.

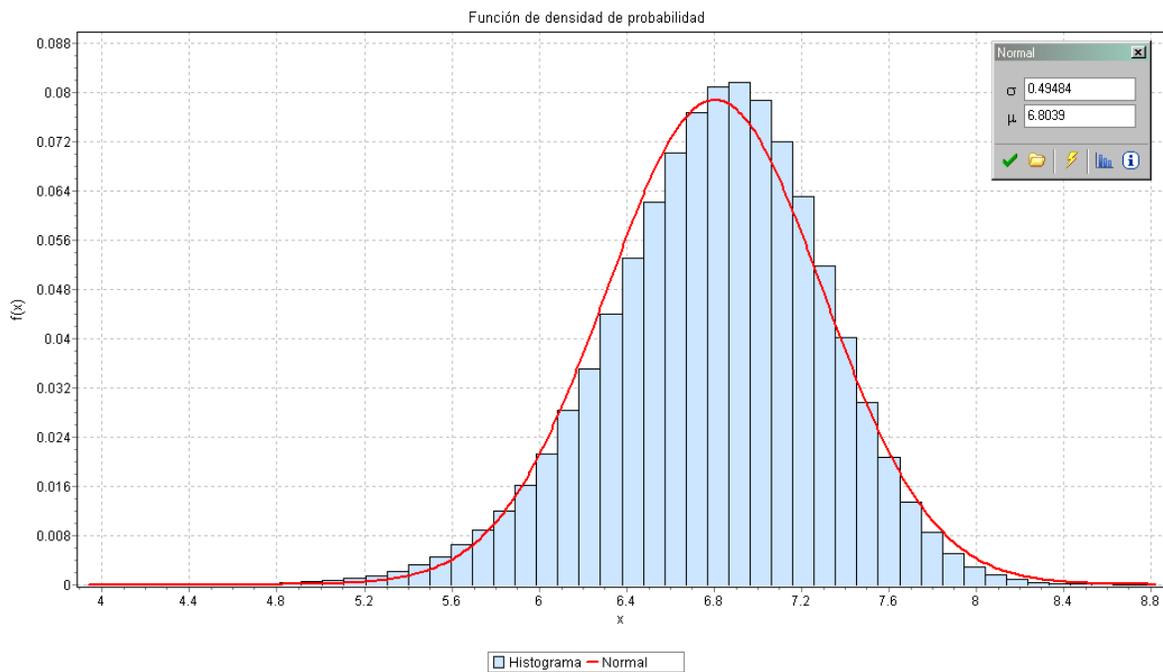


Figura 10-4: Función densidad de probabilidad. 25 FD, DM 70%.

z0	FrEq >=	Probabilidad
-2.32	5.66	99%
-1.96	5.83	98%
-1.64	5.99	95%
-1.28	6.17	90%
-0.84	6.39	80%
-0.52	6.55	70%
-0.25	6.68	60%
0	6.80	50%
0.25	6.93	40%
0.52	7.06	30%
0.84	7.22	20%
1.28	7.44	10%
1.64	7.62	5%
1.96	7.77	2.5%
2.32	7.95	1%

Tabla 10-4: Intervalos de confianza. 25 FD, DM 70%.

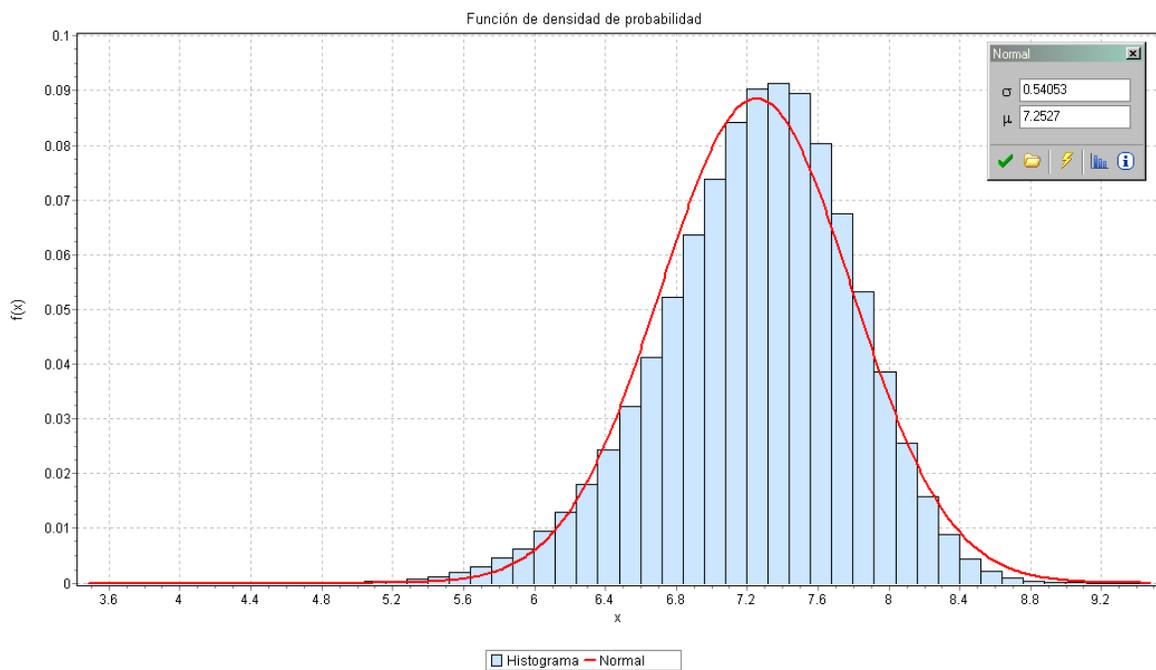


Figura 10-5: Función densidad de probabilidad. 25 FD, DM 80%.

z0	FrEq >=	Probabilidad
-2.32	6.00	99%
-1.96	6.19	98%
-1.64	6.37	95%
-1.28	6.56	90%
-0.84	6.80	80%
-0.52	6.97	70%
-0.25	7.12	60%
0	7.25	50%
0.25	7.39	40%
0.52	7.53	30%
0.84	7.71	20%
1.28	7.94	10%
1.64	8.14	5%
1.96	8.31	2.5%
2.32	8.51	1%

Tabla 10-5: Intervalos de confianza. 25 FD, DM 80%.

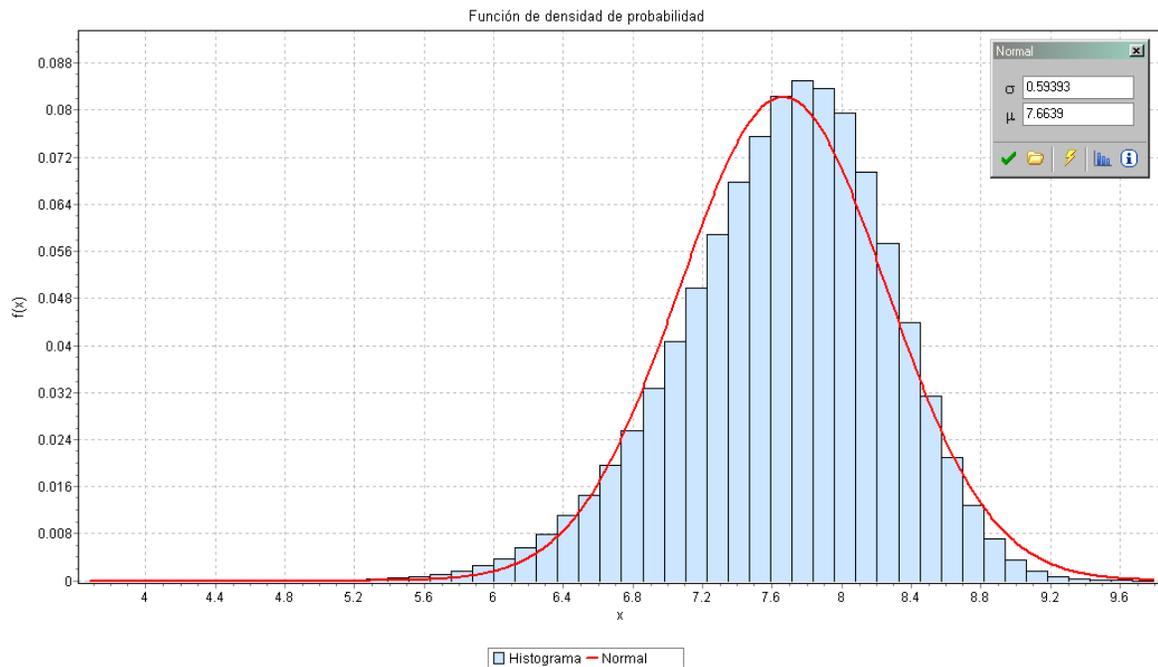


Figura 10-6: Función densidad de probabilidad. 25 FD, DM 90%.

z0	FrEq >=	Probabilidad
-2.32	6.29	99%
-1.96	6.50	98%
-1.64	6.69	95%
-1.28	6.90	90%
-0.84	7.16	80%
-0.52	7.36	70%
-0.25	7.52	60%
0	7.66	50%
0.25	7.81	40%
0.52	7.97	30%
0.84	8.16	20%
1.28	8.42	10%
1.64	8.64	5%
1.96	8.83	2.5%
2.32	9.04	1%

Tabla 10-6: Intervalos de confianza. 25 FD, DM 90%.

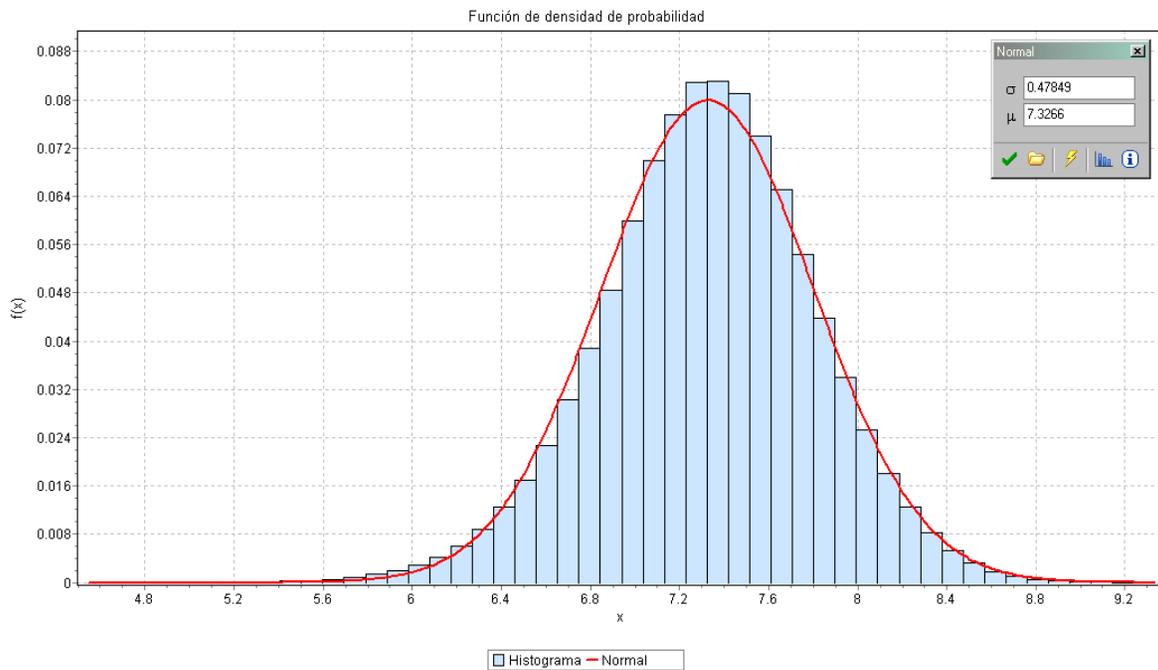


Figura 10-7: Función densidad de probabilidad. 30 FD, DM 70%.

z_0	FrEq \geq	Probabilidad
-2.32	6.22	99%
-1.96	6.39	98%
-1.64	6.54	95%
-1.28	6.71	90%
-0.84	6.92	80%
-0.52	7.08	70%
-0.25	7.21	60%
0	7.33	50%
0.25	7.45	40%
0.52	7.58	30%
0.84	7.73	20%
1.28	7.94	10%
1.64	8.11	5%
1.96	8.26	2.5%
2.32	8.44	1%

Tabla 10-7: Intervalos de confianza. 30 FD, DM 70%.

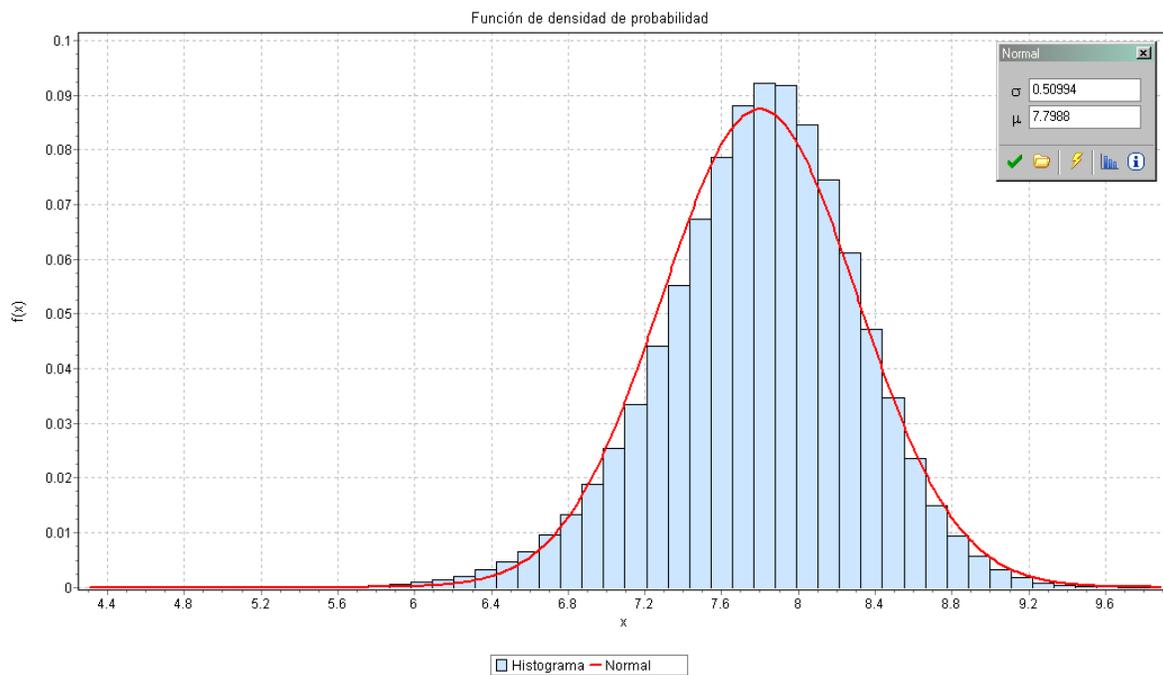


Figura 10-8: Función densidad de probabilidad. 30 FD, DM 80%.

z_0	FrEq \geq	Probabilidad
-2.32	6.62	99%
-1.96	6.80	98%
-1.64	6.96	95%
-1.28	7.15	90%
-0.84	7.37	80%
-0.52	7.53	70%
-0.25	7.67	60%
0	7.80	50%
0.25	7.93	40%
0.52	8.06	30%
0.84	8.23	20%
1.28	8.45	10%
1.64	8.64	5%
1.96	8.80	2.5%
2.32	8.98	1%

Tabla 10-8: Intervalos de confianza. 30 FD, DM 80%.

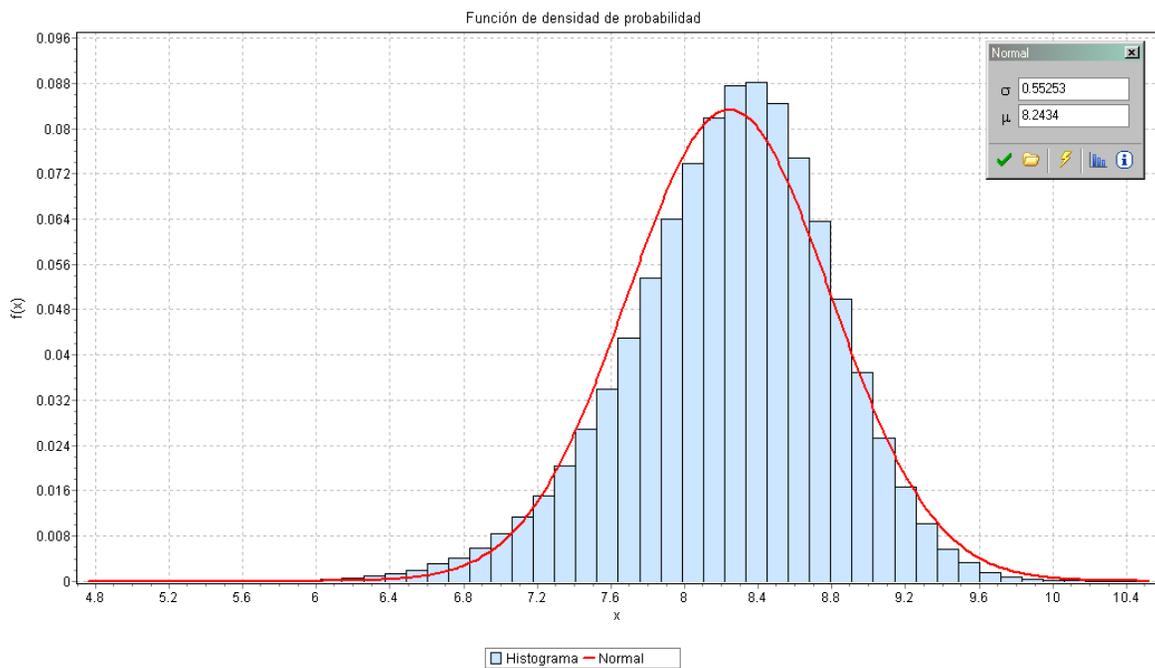


Figura 10-9: Función densidad de probabilidad. 30 FD, DM 90%.

z0	FrEq >=	Probabilidad
-2.32	6.96	99%
-1.96	7.16	98%
-1.64	7.34	95%
-1.28	7.54	90%
-0.84	7.78	80%
-0.52	7.96	70%
-0.25	8.11	60%
0	8.24	50%
0.25	8.38	40%
0.52	8.53	30%
0.84	8.71	20%
1.28	8.95	10%
1.64	9.15	5%
1.96	9.33	2.5%
2.32	9.53	1%

Tabla 10-9: Intervalos de confianza. 30 FD, DM 90%.

11.ANEXO C

Modelo de asignación - DLA

GENERAR ASIGNACION Reporte Guardar

FRENTE S				EQUIPOS			
Nombre	Estado	%Comp.	N°	Nombre	OK	Labor	T.Ciclo
FRENTE01	Fortificacion	0%	1	E332	<input checked="" type="checkbox"/>	Marina	156
FRENTE02	Fortificacion	0%	2	E339	<input checked="" type="checkbox"/>	Marina	156
FRENTE03	Shotcrete	0%	3	E340	<input checked="" type="checkbox"/>	Marina	156
FRENTE04	Shotcrete	0%	4	E123	<input checked="" type="checkbox"/>	Fortifica...	148
FRENTE05	Perforacion	0%	5	E134	<input checked="" type="checkbox"/>	Fortifica...	148
FRENTE06	Hilteo	0%	6	E145	<input checked="" type="checkbox"/>	Fortifica...	148
FRENTE07	Fortificacion	0%	7	E237	<input checked="" type="checkbox"/>	Lechado	151
FRENTE08	Marina	0%	8	E238	<input checked="" type="checkbox"/>	Lechado	151
FRENTE09	Hilteo	0%	9	E239	<input checked="" type="checkbox"/>	Malla	135
FRENTE10	Lechado	0%	10	E241	<input checked="" type="checkbox"/>	Malla	135
FRENTE11	Hilteo	0%	11	E250	<input checked="" type="checkbox"/>	Hilteo	148
FRENTE12	Fortificacion	0%	12	EA26	<input checked="" type="checkbox"/>	Hilteo	148
FRENTE13	Marina	0%	13	E649	<input checked="" type="checkbox"/>	Shotcrete	125
FRENTE14	Marina	0%	14	EA35	<input checked="" type="checkbox"/>	Shotcrete	125
FRENTE15	Shotcrete	0%	15	E148	<input checked="" type="checkbox"/>	Perforacion	202
FRENTE16	Marina	0%	16	E155	<input checked="" type="checkbox"/>	Perforacion	202
FRENTE17	Hilteo	0%	17	E156	<input checked="" type="checkbox"/>	Perforacion	202
FRENTE18	Hilteo	0%	18		<input checked="" type="checkbox"/>		
FRENTE19	Fortificacion	0%	19		<input checked="" type="checkbox"/>		
FRENTE20	Marina	0%	20		<input checked="" type="checkbox"/>		
FRENTE21	Marina	0%	21		<input checked="" type="checkbox"/>		
FRENTE22	Fortificacion	0%	22		<input checked="" type="checkbox"/>		
FRENTE23	Shotcrete	0%	23				
FRENTE24	Hilteo	0%	24				
FRENTE25	Lechado	0%	25				
		0%	26				
		0%	27				
		0%	28				
		0%	29				
		0%	30				

Figura 11-1: Ventana principal

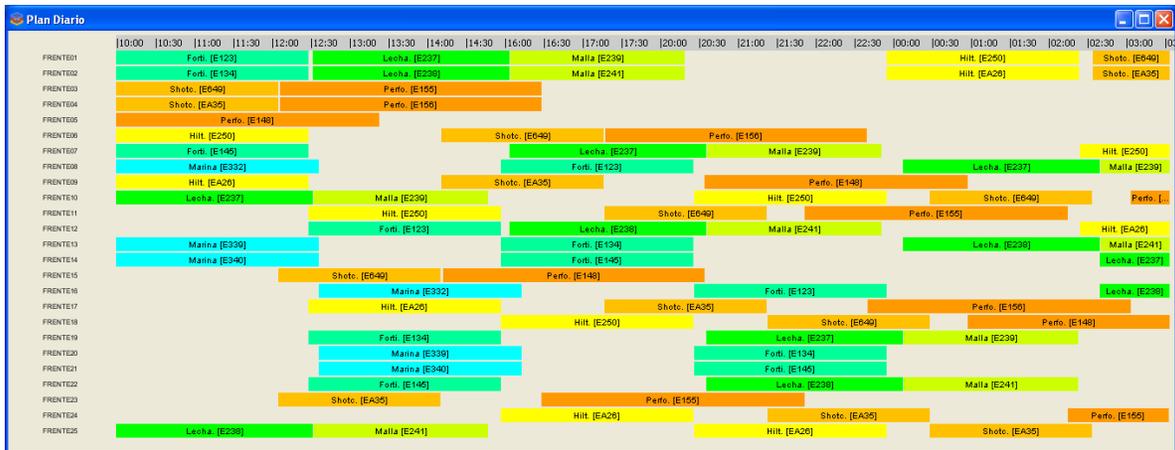


Figura 11-2: Ventana con asignación

ReporteEquipos.pdf - Adobe Reader

Archivo Edición Ver Ventana Ayuda

7 / 17 64.6%

Herramientas Firmar Comentario

E237

Ubicacion	Actividad	T. Inicio	T. Fin	% Inicial	% Final
FRENTE10	Lecha.	10:00	12:31	0	100
FRENTE01	Lecha.	12:31	16:02	0	100
FRENTE07	Lecha.	16:02	20:33	0	100
FRENTE19	Lecha.	20:33	00:04	0	100
FRENTE08	Lecha.	00:04	02:35	0	100
FRENTE14	Lecha.	02:35	03:30	0	36

Figura 11-3: Reporte de equipos

ReporteFrentes.pdf - Adobe Reader

Archivo Edición Ver Ventana Ayuda

8 / 25 64.6%

Herramientas Firmar Comentario

FRENTE08

Equipo	Actividad	T. Inicio	T. Fin	% Inicial	% Final
E332	Marina	10:00	12:36	0	100
E123	Forti.	14:56	20:24	0	100
E237	Lecha.	00:04	02:35	0	100
E239	Malla	02:35	02:35	0	40

Figura 11-4: Reporte de frentes