

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

**USO DE MODELOS ESTOCÁSTICOS PARA EL CÁLCULO DE
PRODUCTIVIDADES DE LA MINA RADOMIRO TOMIC**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JAIME ANDRÉS BAHAMONDES NAVARRETE

PROFESOR GUÍA:

JUAN LUIS YARMUCH GUZMÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

RAFAEL EPSTEIN NUMHAUSER

RAUL CASTRO RUIZ

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL DE 2014

RESUMEN

Radomiro Tomic (RT) es una mina a cielo abierto perteneciente a CODELCO Chile. Actualmente, RT explota minerales oxidados que son procesados en su propia planta, y minerales sulfurados que son enviados a la concentradora de la mina Chuquicamata, ubicada a 8.5 km de distancia. Adicionalmente, para el año 2018 y en marco del proyecto de expansión “Sulfuros RT fase II”, estará en funcionamiento la planta de procesamiento de sulfuros RT, aumentando a tres los lugares activos para el chancado del mineral.

Se prevé un complejo escenario para el 2018 en relación al manejo de materiales de RT, producto del alto número de camiones estimados para la fecha (105) y de los 4 chancadores primarios que estarán en funcionamiento: 2 en sulfuros RT, 1 en óxidos y 1 de sulfuros Chuquicamata. Por cuanto este trabajo busca estimar, utilizando la teoría de colas, qué congestión se podría producir en los servicios de carguío y chancado durante ese año.

Para la estimación de tiempos de cola en un circuito, Jorgen Elbrond propuso en 1977 una metodología basada en la teoría de colas, observaciones en terrero y en simulaciones. Utilizando esta metodología e incorporando modificaciones tales como en las horas de operación de los equipos, se construyó un modelo de RT para el mes de septiembre del año 2012, y una vez calibrado con datos reales se determinó una desviación en los tiempos de cola de 30% el cual al ser aplicado a data real se reduce a 25% (Error intrínseco). Luego de aplicar este modelo al sistema minero del 2018 se logra una re-estimación en el tiempo de ciclo medio como consecuencia de agregar el tiempo de cola, además de la re-estimación de los camiones efectivos. La Ilustración i muestra la diferencia del tiempo de ciclo medio y el total de camiones para la metodología tradicional y el caso con colas incorporadas.

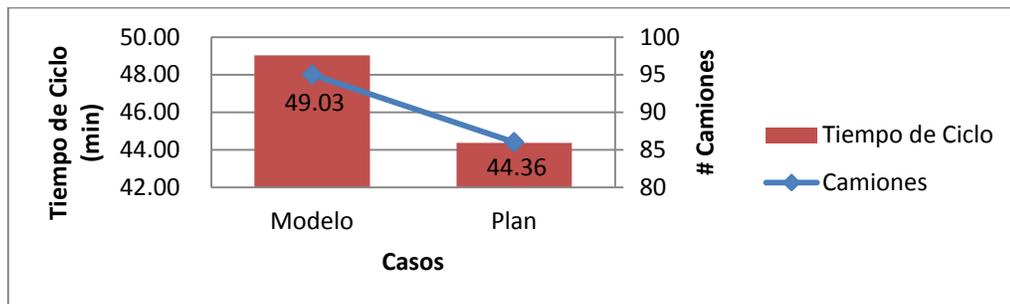


Ilustración i – Tiempo de ciclo y número de camiones obtenido mediante el modelo y cálculo tradicional

Considerando el error asociado del modelo calibrado, los camiones efectivos requeridos para el cumplimiento del plan aumentan en 9. Si bien esta herramienta no indica de manera precisa el número de camiones extra a comprar, por el error asociado a la estimación, sí entrega una información más fidedigna sobre el cumplimiento del plan minero pues la estimación del tiempo de cola es más cercana a lo que planificación de largo plazo realiza hoy en día. En cuanto a posibles mejoras del modelo a futuro, estas hacen referencia principalmente a cambios en el modelamiento, esto en términos de replanteamiento de las ecuaciones de teoría de colas, incorporando la fenomenología observada en las distribuciones de probabilidad.

ABSTRACT

Radomiro Tomic (RT) is an open pit mine belonging to Codelco Chile. Currently, RT extracts oxidized ore, processed in its own processing plant and sulphide ore, processed in plant of Chuquicamata, located at 8.5 km. Additionally, in 2018, in context of the project “Sulfuros RT fase II”, the new RT sulphide processing plant will be operating, therefore there will be three crushing locations.

It is expected a complex scenario from standpoint of material handling, due to the high quantity of trucks for that year (105) and the 4 operating primary crushers (2 at RT sulphide plant, 1 at oxide plant and 1 sending sulphide ore to Chuquicamata). This research seeks to estimate the congestion at loading and crushing servers, using queuing theory.

Jorgen Elbrond proposed in 1977 a methodology to estimate waiting times in queue for a single circuit, based on queuing theory, observations and simulations. Using this methodology with some modifications, mainly in equipment operation hours, a RT model was built for September 2012, calibrated with real data, achieving a deviation of 30% in queuing time, when mine plan is modeled and an error of 25% modeling real data. Applying this model to the 2018 mining system achieves a reestimation of average cycle time and a recalculation of truck fleet due to the additional time added by queuing. The figure i shows the variation between traditional time and fleet estimation and model.

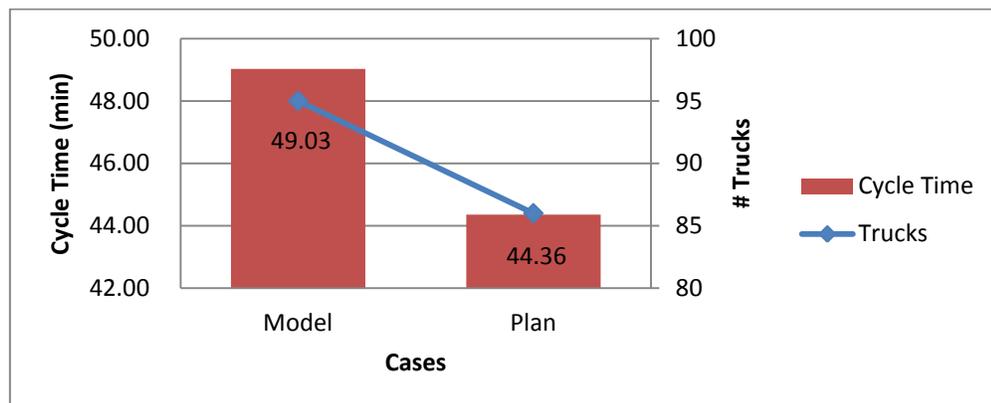


Figure i – Cycle time and truck fleet calculated by model and traditional methodology

Calibration model has an associated error, thus the required truck fleet for reaching the target of the production increases in 9 trucks. This model provides a new information about the reaching of mine plans, due to the queuing time is closer to real queuing time than the long term plan estimation. Improvements are primarily of modeling changes, specifically to the queuing equations and phenomenology representation, issue outside the scope of work.

A la memoria de Brisa Gahona Barrios y Rogelio Navarrete Cartes (Q.E.P.D)

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer primero que todo a mis padres y a mi hermana, por el incondicional apoyo durante estos años fuera de casa, sin ellos jamás pudiera haber llegado a esta instancia. A mi tía Ninfa, quien me recibió durante mi época universitaria como un hijo en su casa, dándome todas las condiciones de poder desarrollar mis estudios de la mejor manera, es sin duda algo que apreciaré toda mi vida. A mis tíos y primos quienes siempre creyeron en mí y se emocionaban cada vez que viajaba a Chillán a contarles cómo me estaba yendo. A mis padrinos quienes fueron un tremendo soporte económico y espiritual.

A mi polola Carolina, que con su inmensa preocupación día tras día apoyaba mi trabajo, me ayudó mucho con la redacción y cosas del Word para las que soy muy ñurdo. Pero lo que más agradezco es su cariño y dedicación.

A mis amigos de la Escuela, que si los nombro temo cometer el error de excluir a algunos, pero tanto a “Las Caras” como a los compañeros de plan común, gracias por su apoyo en especial en esta última parte de la carrera que es donde más costó.

A mis amigos de Chillán, “La Pandilla”, que cada vez algo no andaba bien eran los primeros en levantarme el ánimo con cada lesera que conversábamos, muchas gracias.

A mis profesores de la comisión, a Juan Luis quien me tuvo una paciencia infinita, soportando mis spam y eternas dudas. Fue además quien me motivó a no ceder y terminar con el trabajo ya comenzado. Al profesor Epstein por sus consejos para construir el modelo, y el gran interés mostrado cuando me presenté con el tema. Al profesor Castro por enseñarme sobre el modelo de Elbrond en clases y darme sabios consejos en la corrección del primer borrador.

A mis amigos de SRK, en especial a don Eduardo Bastías, quien fue la primera persona que me motivó por seguir el área mina en mi práctica I. Al Leo y todos los demás muchachos por enseñarme como se lleva a la realidad lo aprendido en las salas de clases.

A las personas de Codelco, quienes me dieron la oportunidad de realizar esta tarea y que aportaron con los datos, Hugo Martínez, Luis Riquelme, Jorge Palma y Raúl Carmona, sin ellos nada de esto se pudo haber construido.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Problemática y motivación	4
1.2. Objetivo	5
1.2.1. Objetivos específicos	5
1.3. Alcances	5
2. Antecedentes	6
2.1. Cálculo de equipos de carguío y transporte	6
2.1.1. Norma ASARCO	6
2.1.2. Índices operacionales	7
2.1.3. Metodología tradicional del cálculo de equipos	8
2.2. Ciclos del sistema de carguío y transporte	9
2.2.1. Confiabilidad de la flota de equipos	10
2.3. Teoría de Colas	11
2.3.1. Características de los sistemas de cola	12
2.3.1.1. Patrón de llegada de los clientes	12
2.3.1.2. Patrón de servicio de los servidores	12
2.3.1.3. Disciplina de la cola	12
2.3.1.4. Capacidad del sistema	12
2.3.1.5. Número de canales del servicio	12
2.3.1.6. Etapas de servicio	13
2.3.2. Nomenclatura	13
2.3.3. Procesos de Poisson y tiempos entre llegadas con distribución exponencial	14
2.3.4. Sistema M/M/1	14
2.3.5. Sistema M/G/1	15
2.4. Modelo de redes de colas – Elbrond	16
2.5. Ajuste de datos	20
2.5.1. Definiciones [11]	21
2.5.2. Determinación del tipo de distribución de un conjunto de datos	21
2.5.3. Test de Chi cuadrado	22
2.5.4. Test de Kolmogorov - Smirnov	22
2.5.5. Test de Anderson - Darling	23
3. Metodología	24
3.1. Problema a resolver	25
3.2. Recolección de datos	26
3.3. Programación del modelo	26
3.4. Validación del modelo	27
3.5. Aplicación del modelo al caso de estudio	27
4. Modelo de redes de cola	28
4.1. Modelo de calibración	28

4.1.1.	Plan minero – Septiembre 2012.....	30
4.1.2.	Equipos de carguío y transporte – Septiembre 2012	31
4.1.3.	Selección de días a modelar	32
4.1.4.	Recolección de datos	32
4.1.5.	Planes mineros diarios	35
4.1.6.	Supuestos del modelamiento	40
4.1.7.	Modelamiento.....	42
4.2.	Resultados	46
4.2.1.	Tiempos en cola	46
4.2.2.	Producción y flota de camiones	48
4.2.3.	Error del modelo	49
4.3.	Caso de estudio.....	52
4.3.1.	Plan Minero mensualizado 2018.....	53
4.3.2.	Equipos de carguío y transporte – 2018.....	54
4.3.3.	Selección de meses a modelar	55
4.3.4.	Modelamiento.....	61
4.3.5.	Resultados.....	61
4.4.	Análisis de resultados - 2018.....	69
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	71
6.	Bibliografía	73
Anexos.....		75

Índice de Figuras

Ilustración 1: Operación en Radomiro Tomic	1
Ilustración 2: Ubicación geográfica de la faena	3
Ilustración 3: Distribución de tiempos ASARCO RT	7
Ilustración 4: Diagrama de colas	11
Ilustración 5: Servidores paralelos	13
Ilustración 6: Sistema para una pala y un tiempo de retorno	17
Ilustración 7: Sistema para 2 servidores en paralelo	18
Ilustración 8: Sistema de varios circuitos con un servidor en común	18
Ilustración 9: Red pala - chancado	24
Ilustración 10: Red pala - lastre (stock)	24
Ilustración 11: Redes de cola	25
Ilustración 12: Layout de RT, Septiembre 2012	29
Ilustración 13: Movimiento mina septiembre 2012	30
Ilustración 14: Carguío y transporte en RT	31
Ilustración 15: Histograma de tiempos de carguío - 4100 XPA - Komatsu	33
Ilustración 16: Histograma descarga - Komatsu - Chancador de óxidos	34
Ilustración 17: Histograma de aculatamiento - Komatsu - Chancador de óxidos	34
Ilustración 18: Modelo de velocidades Komatsu vacío	35
Ilustración 19: Modelo de velocidades Komatsu cargado	35
Ilustración 20: Polígonos de plan de corto plazo, fase 32	36
Ilustración 21: Plan diario de producción, 8 de Septiembre de 2012	37
Ilustración 22: Plan diario de producción, 9 de Septiembre de 2012	38
Ilustración 23: Plan diario de producción, 21 de Septiembre de 2012	39
Ilustración 24: Plan diario de producción, 22 de Septiembre de 2012	40
Ilustración 25: Ciclo equivalente - Palas	41
Ilustración 26: Camión Trepasa descargando en RT	42
Ilustración 27: Programa Macros para estimación de tiempo en cola	44
Ilustración 28: Diagrama de operación de semana 3, septiembre 2012	45
Ilustración 29: Esperas 8 de septiembre	46
Ilustración 30: Esperas 9 de septiembre	47
Ilustración 31: Esperas 21 de septiembre	47
Ilustración 32: Esperas 22 de septiembre	48
Ilustración 33: Error del modelo por variable	51
Ilustración 34: Nube de dispersión real vs modelo data real	51
Ilustración 35: Layout planta de procesamiento de sulfuros RT	52
Ilustración 36: Layout mina RT, 2018	53
Ilustración 37: Plan minero mensualizado 2018	54
Ilustración 38: Cargador Le Torneau 1850 operando en RT	55
Ilustración 39: Tiempo en cola por servidor - febrero 2018	62

Ilustración 40: Tiempo en cola por servidor - junio 2018	62
Ilustración 41: Tiempo en cola por servidor - octubre 2018.....	63
Ilustración 42: Tiempo en cola por servidor - diciembre 2018	63
Ilustración 43: Producción planificada y modelada - febrero 2018	64
Ilustración 44: Producción planificada y modelada - junio 2018.....	64
Ilustración 45: Producción planificada y modelada - octubre 2018.....	65
Ilustración 46: Producción planificada y modelada - diciembre 2018.....	66
Ilustración 47: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - febrero 2018	67
Ilustración 48: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - junio 2018.....	67
Ilustración 49: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - octubre 2018.....	68
Ilustración 50: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - diciembre 2018	68
Ilustración 51: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - promedio 2018.....	69

Índice de tablas

Tabla 1: Simbología de notación de colas.....	14
Tabla 2: Plan minero Septiembre 2012	30
Tabla 3: Equipos de transporte, Septiembre 2012	31
Tabla 4: Equipos de carguío, Septiembre 2012	31
Tabla 5: Movimiento real mina, septiembre 2012.....	32
Tabla 6: Filtros en componentes del ciclo	32
Tabla 7: Plan diario de producción, 8 de Septiembre de 2012.....	37
Tabla 8: Plan diario de producción, 9 de Septiembre de 2012.....	38
Tabla 9: Plan diario de producción, 21 de Septiembre de 2012.....	39
Tabla 10: Plan diario de producción, 22 de Septiembre de 2012.....	40
Tabla 11: Cálculo de camiones, circuito chancador óxidos, 21 septiembre	43
Tabla 12: Disponibilidad mecánica de equipos de carguío	44
Tabla 13: Espera real vs espera modelo	48
Tabla 14: Cálculo de camiones 2012	49
Tabla 15: Ciclo PND + Cola	49
Tabla 16: Diferencias de esperas por variables	50
Tabla 17: Equipos de transporte, 2018	54
Tabla 18: Equipos de carguío, 2018.....	55
Tabla 19: Plan promedio diario, febrero 2018	57
Tabla 20: Plan promedio diario, junio 2018	58
Tabla 21: Plan promedio diario, octubre 2018.....	59
Tabla 22: Plan promedio diario, diciembre 2018	60
Tabla 23: Producción planificada y modelada - febrero 2018	64
Tabla 24: Producción planificada y modelada - junio 2018	65
Tabla 25: Producción planificada y modelada - octubre 2018.....	65
Tabla 26: Producción planificada y modelada - diciembre 2018	66

1. Introducción

Radomiro Tomic (RT), perteneciente a Codelco Chile es una mina explotada por el método de rajo abierto. Ésta se encuentra ubicada a 1,250 kilómetros de la ciudad de Santiago, a 45 kilómetros al norte de Calama y a 3,000 metros sobre el nivel del mar. RT extrae tanto minerales oxidados de cobre, que son procesados en la planta de óxidos ubicada al costado de la mina, como también produce minerales sulfurados, que son enviados a la concentradora de Chuquicamata mediante una correa overland de 8.5 kilómetros de extensión.

La división RT fue creada en 1995, sin embargo el yacimiento se conoce desde 1952, cuando fue descubierto en la búsqueda de mineralización de óxidos en el área denominada “Pampa Norte”, al norte de la mina Chuquicamata. Durante el año 1996 se comenzó con la fase de remoción de estéril o prestripping, dando así el comienzo al primer proyecto arrancado por Codelco Chile.



Ilustración 1: Operación en Radomiro Tomic

La producción de RT comienza con la extracción de mineral desde el rajo abierto, en bancos de 15 metros, mediante métodos convencionales de perforación rotatoria, tronadura, carguío y transporte. El mineral extraído es transportado por camiones de alto tonelaje al chancador primario de óxidos o al chancador primario de sulfuros Chuquicamata, dependiendo de la frente en la cual fue cargado. El mineral transportado al chancador de sulfuros Chuquicamata, posterior a su proceso de conminución es acarreado 8.5 kilómetros por una correa hasta la concentradora de Chuquicamata. El

mineral descargado en el chancador primario de óxidos, es procesado posteriormente por chancadores secundarios y terciarios, reduciendo su tamaño hasta alcanzar valores en torno a 1 pulgada. Luego es nuevamente transportado mediante correas para dar inicio del proceso hidrometalúrgico, donde el mineral es aglomerado y luego puesto en pilas para su lixiviación. La solución rica en cobre generada en la lixiviación o PLS, por sus siglas en inglés (pregnant leach solution) es capturado por carpetas y transportado por tuberías hasta el siguiente proceso de extracción por solventes, donde el PLS es mezclado en contracorriente con una solución orgánica de baja concentración, capturando el cobre contenido. La solución es puesta en contacto con una solución electrolítica que es enviada a las naves de electroobtención, donde con la aplicación corriente, el cobre de la solución es depositado sobre placas de acero, formando el cátodo de cobre.

La división Radomiro Tomic se encuentra actualmente desarrollando la etapa de Ingeniería de Factibilidad del Proyecto Sulfuros Radomiro Tomic Fase II, la cual busca explotar los óxidos restantes y sulfuros, para luego procesarlos en una concentradora propia. Esta planta recibirá gran parte de los sulfuros extraídos desde el rajo Radomiro Tomic (RT), mientras que una cantidad menor de mineral sulfurado será aun enviado a la concentradora de Chuquicamata. El movimiento mina se estará en torno a 670 [ktpd], considerando mineral a procesamiento, mineral marginal a stock y material estéril a botaderos [1].

El mineral enviado a la concentradora de Chuquicamata tiene como objetivo completar la capacidad de diseño de la planta. Actualmente el rajo de Chuquicamata no es capaz de copar su concentradora y se prevé una etapa crítica durante el ramp up de la mina subterránea.

Se prevé que el año 2018 será el año más complejo en términos de manejo de materiales, pues durante ese año, RT debe alimentar su nueva planta de concentración de minerales sulfurados, la planta de lixiviación de minerales oxidados y alimentar en gran parte la concentradora de Chuquicamata, cuya mina subterránea se encontrará en el ramp up de la producción.

Las reservas proyectadas para la vida mina de RT, cuya producción se estima hasta el año 2060, son:

- Óxidos 228,000 kton
- Sulfuros Chuquicamata 828,948 kton
- Sulfuros RT 1,804,767 kton

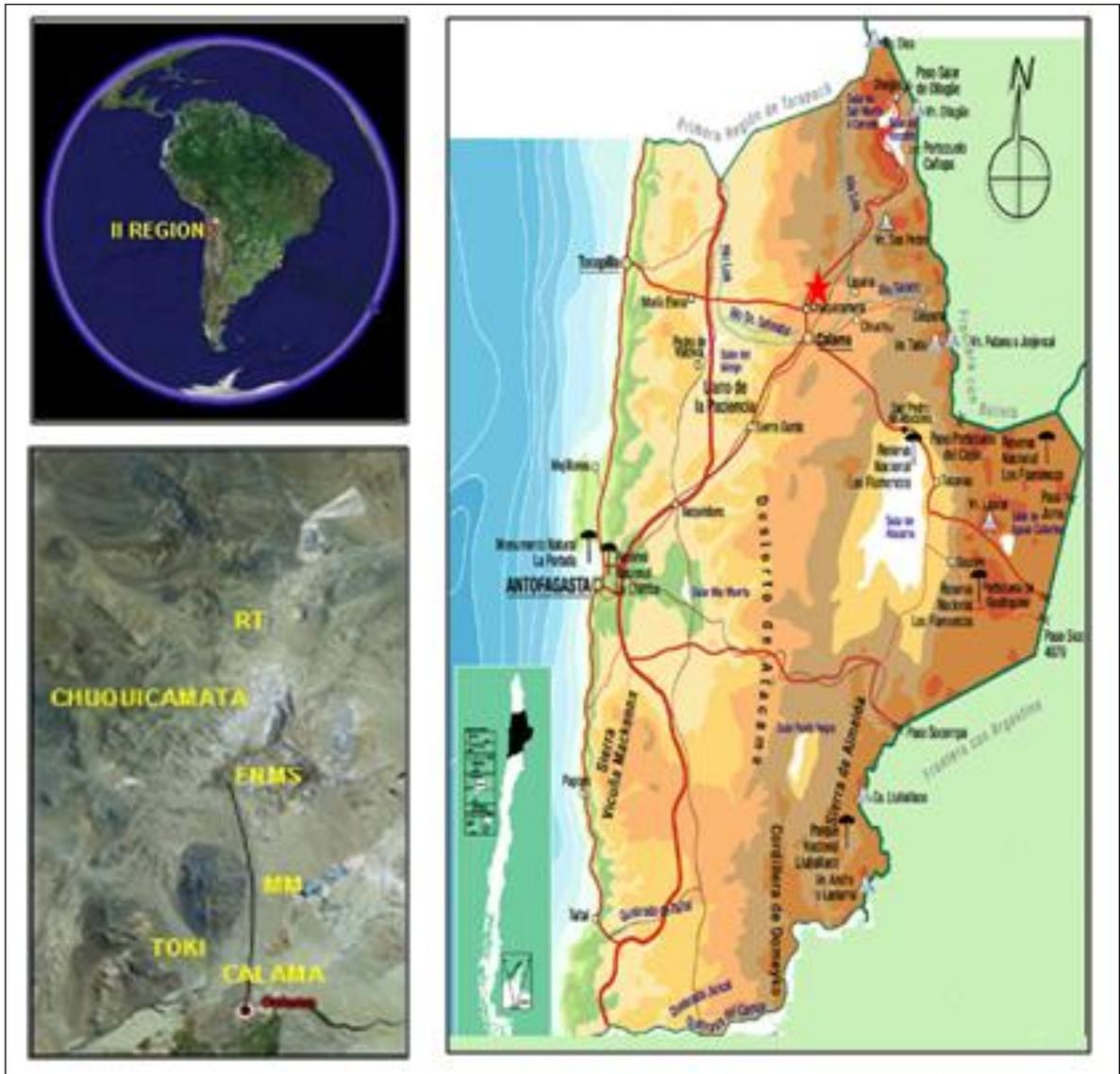


Ilustración 2: Ubicación geográfica de la faena

Para el sistema de transporte del rajo RT, el dimensionamiento de la flota de equipos, para el año 2018, fue realizado de manera determinista. Por tanto solo considera tiempos y otros parámetros fijos y no eventos aleatorios. Sin embargo, en el manejo de materiales existen una serie de eventos de naturaleza estocástica, cuya interacción resulta imposible de ser estimada mediante parámetros determinísticos. Algunos de estos eventos son [2]:

- Espera de camiones por disponibilidad de equipo de carguío o viceversa
- Interacción de los camiones en la ruta de transporte
- Fallas en los equipos fijos y móviles
- Interrupciones operacionales como: tronaduras, colaciones y cambios de turno.

La interacción entre eventos aleatorios dificulta la predicción del comportamiento real del sistema, así como también la determinación de las principales vulnerabilidades del sistema de manejo de materiales.

En el cálculo tradicional de flota de equipos, si bien se consideran las pérdidas operacionales por cola, estas son constantes, para toda pala y todo chancador. Esta situación no refleja la interacción entre distintos equipos, distintas asignaciones y diferentes disponibilidades.

Con el objetivo de tener una mejor aproximación del tiempo de ciclo de camiones, y así mejorar el dimensionamiento de la flota es que este trabajo busca estimar el tiempo perdido en colas mediante el modelo de Elbrond, propuesto en 1977.

1.1. Problemática y motivación

Durante el año 2018 la mina Radomiro Tomic tiene la misión de alimentar 3 plantas de procesamiento: Planta de sulfuros RT, planta de óxidos RT y gran parte de la planta concentradora de Chuquicamata. Considerando que la nueva mina subterránea estará en el ramp – up de producción durante ese año, y que RT seguirá removiendo lastre de cada fase, así como moviendo otros materiales que no son procesados directamente, como los óxidos de baja ley (OBL), es que se prevé un complejo escenario para ese año en términos de manejo de materiales.

El presente estudio permitirá determinar si con el dimensionamiento tradicional de la flota de equipos será posible satisfacer el plan minero para el año 2018, además de observar los principales cuellos de botella del sistema. Para ello se evaluará el problema utilizando un método de cálculo de capacidad de una faena a cielo abierto, propuesto en 1977 por Jorgen Elbrond.

El modelo de Elbrond está basado en la teoría de colas para un circuito cerrado, ajustando los valores por un sistema de factores de corrección, donde se reflejan las variabilidades presentes. Con tal de mejorar la estimación de los tiempos de ciclo, el objetivo será determinar los tiempos de espera en colas de carguío y en colas de la descarga de material en chancado.

Para el año 2018, División RT contará con 108 camiones equivalentes de extracción, con capacidad nominal de 330 toneladas cortas, 13 equipos de carguío, divididos en palas de cables, palas hidráulicas y cargadores frontales y con 4 chancadores primarios, 2 en línea con la planta de sulfuros Radomiro Tomic, un chancador para la planta de óxidos y un chancador que alimenta la correa overland en dirección a la concentradora de Chuquicamata.

1.2. Objetivo

- Estudiar el uso de teoría de colas para modelar el sistema de manejo de materiales de la mina Radomiro Tomic.

1.2.1. Objetivos específicos

- Determinar componentes relevantes que afecten a la productividad del sistema de manejo de materiales en una mina a cielo abierto.
- Generar un modelo con redes de cola, aplicando la teoría propuesta por Jorgen Elbrond (1977) para estimar tiempos de pérdidas operacionales de equipos de transporte y la productividad de la mina.
- Calibrar y validar el modelo utilizando datos reales de la mina, obtenidos por el sistema Jigsaw durante el mes de septiembre de 2012.

1.3. Alcances

En este trabajo se modela el sistema de la mina a cielo abierto Radomiro Tomic, donde el modelo de redes de cola tendrá un enfoque de estado estacionario.

Para el modelo sólo se considera el estudio del año 2018 del plan de negocios divisional, por ser el año más complejo en términos de manejo de materiales, explicado por la necesidad de enviar mineral a la planta concentradora de Chuquicamata.

Se calibrará el modelo utilizando la base de datos de Jigsaw del mes de septiembre de 2012, reporte que entrega todos los tiempos reales del ciclo de cada camión, el tonelaje que transportó y las instancias en que los equipos de producción tuvieron fallas o entraron en mantención.

2. Antecedentes

2.1. Cálculo de equipos de carguío y transporte

En la minería a cielo abierto es fundamental el correcto dimensionamiento de equipos de carguío y transporte. La subestimación del dimensionamiento podría tener consecuencias graves como el no cumplimiento de los planes mineros de corto y largo plazo, mientras que una sobreestimación podría tener consecuencias tales como congestión en rutas y lugares de servicio, como en carguío y descarga en chancadores.

La metodología tradicional para la estimación de la flota es función de la producción definida y de las horas de camión requeridas para satisfacer el plan. Por lo tanto depende del tonelaje a extraer diariamente, de las distancias fase – destino, del modelo de velocidades de los equipos y del tiempo de uso efectivo de los equipos, dado que estos pueden estar siendo o no utilizados, como también pueden estar o no disponibles.

En la siguiente sección se detalla como la norma ASARCO define los tiempos e indicadores claves para la distribución de tiempos de los equipos en la faena, utilizada en Radomiro Tomic para la definición de tiempos.

2.1.1. Norma ASARCO

La norma ASARCO (American Smelting & Refining Co.) es el marco de referencia que se utiliza para la definición de conceptos y distribución de los tiempos en que los equipos incurrir en la operación.

Definición de tiempos [1]:

- **Tiempo Cronológico:** Corresponde al tiempo calendario, 365 días/año
- **Tiempo Inhábil:** Tiempo en que la faena suspende las actividades de producción y mantención de equipos.
- **Tiempo Hábil:** Horas en que la faena está en labores productivas o de mantención.
- **Tiempo de mantención y reparación:** Es el tiempo hábil en que el equipo no puede operar debido a fallas o por encontrarse en mantención.
- **Tiempo de Reserva:** Tiempo en que un equipo se encuentra detenido estando en condiciones de operar, debido a que el programa de producción no lo requiere. Es un tiempo de planificación, por lo que demoras no programadas o que sean por necesidades de la operación no deberían adjudicarse a este ítem.

- **Tiempo de operación:** Tiempo en que el equipo, estando en condiciones de operar, se encuentra entregado a su operador para realizar el trabajo asignado
- **Tiempo de operación efectiva:** Tiempo en que el equipo está operando de acuerdo al objetivo para el cual fue adquirido
- **Tiempo de pérdidas operacionales:** Tiempo en que el equipo, estando en condiciones de operar, entregado a su operador y con una tarea asignada, no realiza la tarea por motivos necesarios de la producción, por ejemplo, traslados, limpiezas, interferencias, etc.
- **Demoras no programadas:** Despeje por tronadura, limpieza de canchas, charlas de seguridad, abastecimiento de combustible, agua, etc.
- **Demoras programadas:** Colación y entrada – salida de turno.

Tiempo Cronológico		
Tiempo Hábil (TH)		Tiempo Inhábil (TI)
Tiempo Disponible Físicamente		Mant. Y Repar. (T M)
Tiempo Operación (TO)		Reserva (TR)
Operación. Efectiva (TE)	Dem. No prog. + Pérd. Op. (TP)	Demoras Programadas
Utilización		

Ilustración 3: Distribución de tiempos ASARCO RT

2.1.2. Índices operacionales

- **% Disponibilidad:**

$$Disp = \frac{T. Hábil - T. Mant y Rep}{T. Hábil} * 100\% \quad (1)$$

Proporción del tiempo hábil en que el equipo esta entregado a la operación. Refleja calidad del equipo, de la mantención y las condiciones adversas a éstas.

- **% Utilización:**

$$Util = \frac{T. Hábil - T. Mant y Rep - T. Reserva}{T. Hábil - T. Mant y Rep} * 100\% \quad (2)$$

Proporción del tiempo en que el equipo es operado respecto del tiempo en que el equipo está físicamente disponible. Depende de la necesidad de operar el equipo.

- **% Factor Operacional:**

$$FO = \frac{T.Oper.Efect}{T.Oper} * 100\% \quad (3)$$

Proporción del tiempo de operación, en que el equipo está cumpliendo su labor de diseño.

- **% Utilización efectiva:**

$$U.Efect = Disp * Util * FO \quad (4)$$

Es la proporción del tiempo hábil, en que el equipo está cumpliendo su función de diseño.

- **Rendimiento efectivo:**

$$RE = \frac{Unidades\ físicas\ producidas}{T.Operación\ Efectiva} \quad (5)$$

Unidades físicas producidas por hora de operación efectiva.

2.1.3. Metodología tradicional del cálculo de equipos

El objetivo del cálculo de equipos de producción en una mina es contar con los equipos necesarios para cumplir el plan minero.

La metodología tradicional para el cálculo de equipos mina viene dado por el plan de producción y perfil de distancias de la faena para la vida mina. Con estos antecedentes y con los que pudiera entregar el proveedor del equipo, es posible obtener un vector anual de equipos necesarios por año

La ecuación básica para el cálculo del requerimiento de camiones para cualquier faena a cielo abierto es función de la tasa de extracción y de la tasa de movimiento de material por camión [3].

$$N = \frac{Tasa\ deseada\ de\ extracción}{Tasa\ de\ extracción\ por\ camión} \quad (6)$$

La ecuación también puede ser escrita como:

$$N = \frac{T}{P} * \frac{TCT}{TF} \quad (7)$$

Dónde:

- N = Número de camiones
- T = Tonelaje total
- P = Periodos
- TCT = Tiempo de ciclo del camión
- TF = Factor de tonelaje del camión

Para obtener estos parámetros se debe poseer un buen estudio, pues el tonelaje y número de periodos es un factor que depende entre otros, de aspectos económicos y geométricos del proyecto, ya que estos determinan el tamaño de la explotación y el agendamiento de la extracción.

El tiempo de ciclo de un camión depende fundamentalmente del circuito de transporte de la mina, y éste no es constante durante la vida mina, pues a medida que se profundiza en la extracción los destinos están más alejados aumentando el tiempo de ciclo. Los circuitos están ligados además al diseño de la mina y a la discretización de ésta en fases, que también es función de parámetros económicos y geotécnicos. Además, en el tiempo de ciclo influyen factores como tiempos de interacción con otros equipos lo que genera gran variabilidad en el sistema por lo que estimaciones determinísticas de tiempos de ciclo presentarán siempre un desvío con la realidad, es por ello que las aproximaciones deben ser validadas con datos reales.

Dado que estas variables están todas fuertemente enlazadas las unas con las otras es necesario hacer el proceso de estimación de flota de manera iterativa, con el fin de buscar la mejor productividad al costo más bajo [15].

2.2. Ciclos del sistema de carguío y transporte

El sistema de carguío y transporte en una faena a cielo abierto depende principalmente de los equipos que interactúan y de las rutas definidas para el transporte del material. El ciclo de un camión se puede reducir a tres componentes mayores: movimiento, espera y servicio.

El movimiento de un camión se puede separar en tres sub componentes: (a) tiempo de viaje entre el punto de descarga y la zona de carguío, (b) tiempos de maniobras en zona de carguío o de descarga, (c) tiempo de viaje entre la zona de carguío y la zona de descarga.

El servicio es el tiempo en que el camión está siendo cargado por una pala o el tiempo en que el camión descarga en el chancador o botadero.

La espera del camión se puede separar en dos sub componentes: (a) espera en el punto de maniobras para acularse a la pala y chancador, (b) espera en posición de carguío y chancado.

Algebraicamente, el tiempo de ciclo para un camión se puede escribir como [16]:

$$LCT = STL + LT + TL + STD + DT + TE + AD \quad (8)$$

Dónde:

- LCT: Tiempo de ciclo de la unidad [min]
- STL: Tiempo de maniobras [min]
- LT: Tiempo de carga [min]
- TL: Tiempo de viaje cargado [min]
- STD: Tiempo de maniobras en botadero o chancador [min]
- DT: Tiempo de descarga [min]
- TE: Tiempo de viaje vacío [min]
- AD: Tiempo promedio de demora por espera en botadero, espera en cargador, disminuciones de velocidad en la ruta, etc. [min]

El valor de AD, para tiempo de espera en cargador o chancado, puede ser calculado de manera determinista, considerando situaciones de tiempo constante (tiempo entre llegadas y tiempo de servicio). El valor de AD se calcula como [20]:

$$AD = (TL + STD + DT + TE) - (N - 1) * (STL + LT) \quad (9)$$

$$\text{Con } N = \text{Entero Superior} \left(\frac{LCT}{STL+LT} \right)$$

2.2.1. Confiabilidad de la flota de equipos

Una buena manera de calcular el tamaño de la flota es mediante el uso de probabilidades, a través del uso de la distribución binomial [21].

Definiendo:

- \mathbb{P}_n = Probabilidad que exactamente "n" unidades estén disponibles
- \mathbb{P}_a = Probabilidad que una unidad esté disponible
- \mathbb{P}_{na} = Probabilidad que una unidad no esté disponible
- \mathbb{N} = Número total de unidades en el sistema
- \mathbb{N}_{C_n} = Combinación de N elementos, tomando "n" a la vez ($n \leq \mathbb{N}$)

Luego se obtiene:

$$\mathbb{P}_n = \mathbb{N}_{C_n} * (\mathbb{P}_a)^n * (\mathbb{P}_{na})^{\mathbb{N}-n} \quad (10)$$

$$P_{1n} = \sum_{x=n}^N N_{C_x} * (P_a)^x * (P_{na})^{N-x} \quad (11)$$

Dónde:

P_{1n} = Probabilidad de tener al menos "n" unidades disponibles

Si bien no se utilizará en este trabajo, esta alternativa permite, mediante el uso de probabilidades, estimar la confiabilidad del sistema, considerando la disponibilidad de los equipos.

2.3. Teoría de Colas

Un sistema de colas se puede describir como “clientes” que van en busca de un servicio y que deben esperar si este no es inmediato. El término clientes es genérico y puede ser aplicado en cualquier ámbito, ya sea seres humanos, equipos, automóviles, etc. Para la aplicación a este trabajo, la teoría de colas busca encontrar el tiempo de pérdidas operacionales por espera en cola de los clientes (camiones de extracción) en los servidores (palas y chancadores).

La teoría de colas fue desarrollada a comienzos del siglo 20 como una respuesta ante los problemas que surgían en las centrales telefónicas. Posteriormente se convirtió en un concepto teórico que ha sido fuertemente desarrollado por la investigación operativa.

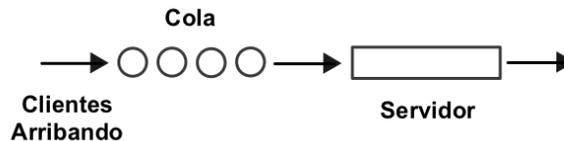


Ilustración 4: Diagrama de colas

El sistema consiste en clientes que llegan al servidor cada un cierto tiempo llamado *tiempo entre llegadas* y son atendidos por el servidor en un tiempo llamado *tiempo de servicio*. Como puede suceder que la capacidad de servicio es menor que la capacidad demandada se generará una cola en el servidor. La teoría de colas busca estudiar el comportamiento de la cola, en términos de tiempo de espera y unidades esperando a ser atendidos [4].

2.3.1. Características de los sistemas de cola

Para describir de manera correcta un sistema de colas se debe establecer las siguientes 6 características:

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

2.3.1.1. Patrón de llegada de los clientes

Generalmente la llegada de los clientes a la cola es estocástica, es decir, la llegada depende de una variable aleatoria y por ende, debe conocerse la distribución probabilística entre dos llegadas sucesivas. Para efectos de este estudio, se debe conocer la distribución del tiempo entre llegadas de los camiones a los distintos servidores.

2.3.1.2. Patrón de servicio de los servidores

Al igual que en las llegadas, los servidores también atienden de manera estocástica y por ello también se debe conocer la función de probabilidad asociada al tiempo de servicio. El tiempo de servicio puede ser dependiente o no del número de clientes en cola y del tiempo transcurrido.

2.3.1.3. Disciplina de la cola

Es el orden en que son atendidos los clientes. El caso más común es la disciplina FIFO (el primero en llegar es el primero en ser atendido) está el caso LIFO (último en llegar, primero en ser atendido) y otras reglas de secuencia, como por prioridades.

2.3.1.4. Capacidad del sistema

En algunos sistemas existe una limitación sobre el número de clientes que pueden esperar en la cola, en estos casos se les denomina colas finitas. Este caso es una simplificación del modelo de impaciencia de los clientes que abandonan la cola.

2.3.1.5. Número de canales del servicio

Un sistema de colas con múltiples servidores se puede conceptualizar como una única cola para todos los servidores o como una cola por cada cliente para el caso de colas independientes. La Ilustración 5 refleja los 2 casos señalados anteriormente.



Ilustración 5: Servidores paralelos

2.3.1.6. Etapas de servicio

Un sistema de colas puede tener una sola etapa como puede ser multietapa. En los sistemas multietapas el cliente pasa por varias etapas, como por ejemplo donde uno primero debe pagar un producto, pasando por la cola de la caja y luego retirarlo en un empaque, haciendo la cola de empaque. En los sistemas multietapas se puede dar vuelta atrás o reciclado, es decir, volver a un proceso anterior nuevamente.

2.3.2. Nomenclatura

La siguiente notación, propuesta por Kendall, ha sido implementada para resumir las características anteriormente mencionadas y representar el sistema de colas [19]:

$$A/B/X/Y/Z$$

Dónde:

- A: Indica la distribución del tiempo entre llegadas
- B: Indica la distribución de probabilidad del tiempos de servicio
- X: Indica el número de servidores del sistema
- Y: Indica la restricción en la capacidad del sistema
- Z: Indica la disciplina de la cola

La Tabla 1 muestra la simbología más común para cada ítem de la notación de colas.

Tabla 1: Simbología de notación de colas

Ítem	Símbolo	Razón
Distribución de tiempos entre llegadas o de servicio	M D E _k G	Dist. Exponencial Determinista Erlang tipo k General
Número de servidores	1, 2, 3,....	
Disciplina de cola	FIFO LIFO RSS PR GD	Servir al primero que llega Servir al último que llega Selección aleatoria Servir por prioridad Disciplina general

Si no existe restricción de capacidad y la política de servicio es FIFO, no se acostumbra a escribir esos términos, restringiendo la notación a los tres primeros (A/B/X).

La nomenclatura utilizada en las ecuaciones de teoría de colas es la siguiente:

- μ : Tasa de servicio por unidad de tiempo
- λ : Tasa de llegadas por unidad de tiempo
- W_q : Tiempo en Cola
- L_q : Largo de la cola

2.3.3. Procesos de Poisson y tiempos entre llegadas con distribución exponencial

Un proceso estocástico es una colección de variables aleatorias $\{X(t)\}_{t \in T}$, con $T \subseteq \mathbb{R}$, donde t es el parámetro que se asocia al tiempo y $X(t)$ representa el estado del proceso en el instante t . Un proceso de Poisson es un proceso que consiste en contar eventos en el cual los intervalos entre eventos consecutivos son variables aleatorias independientes idénticamente distribuidas de acuerdo a una ley exponencial. [5]

2.3.4. Sistema M/M/1

El sistema M/M/1 es el sistema más básico en teoría de colas, este sistema supone tiempo entre llegadas exponencial, tiempos de servicio exponencial y un servidor.

La solución para el sistema M/M/1 se obtiene en función de los parámetros de teoría de colas μ y λ y de la fórmula de Little [6].

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (9)$$

$$L_q = W_q * \lambda \quad (10)$$

Además se puede calcular la probabilidad de haya “n” clientes en el sistema a través de la siguiente expresión:

$$P_n = (1 - \rho) * \rho^n \quad ; \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (11)$$

La variable ρ se denomina congestión de un sistema.

2.3.5. Sistema M/G/1

El sistema M/G/1 es un sistema similar al M/M/1 donde solo difieren en la distribución del tiempo de atención en el servidor, siendo para este caso una distribución general, es decir se debe conocer una media y una desviación estándar.

Diversos autores proponen varias soluciones para esta problemática, en este trabajo se mostrará 2 de ellas, la primera propuesta por Pollaczek-Khinchin (P-K Fórmula) [7] y la segunda propuesta por Curry – Feldman [8].

Las ecuaciones para la estimación de largo de cola y tiempo invertido en cola se presentan a continuación:

$$W_{q P-K} = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \lambda^2 * \sigma^2}{2\lambda * \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)} \quad (12)$$

$$W_{q C-F} = \frac{1 + \mu^2 * \sigma^2}{2} W_{M-M-1} \quad (13)$$

$$L_{q P-K} = \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \lambda^2 * \sigma^2}{2 * \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right)} \quad (14)$$

Dónde:

- μ : Media de la atención
- σ : Desviación estándar

El parámetro $\lambda^2 * \sigma^2$ se denomina coeficiente de variación al cuadrado de los tiempos de servicio.

2.4. Modelo de redes de colas – Elbrond

El modelo propuesto en 1977 está basado tanto en Teoría de Colas como en mediciones en terreno y fórmulas empíricas. Los resultados son ajustados por un sistema de factores de corrección que refleja variabilidades en los tiempos de carguío, viaje y descarga. El modelo consiste básicamente en iteraciones desconociendo el tiempo de espera en el servidor y a medida que se avanza en las iteraciones se utiliza los tiempos de espera calculados en la iteración anterior para determinar la espera en el servidor.

El modelo está basado en tres condiciones del sistema, de las que se obtiene el tiempo de espera en los servidores como resultado:

- El tiempo promedio de servicio tiene valor aleatorio y es igual a la desviación estándar del tiempo de servicio, de la misma forma que para el tiempo de retorno, por lo tanto se aplica el sistema de colas M/M/1. Esto está basado en el trabajo de Posner y Berholtz (1967).
- El tiempo de servicio es constante con un retorno aleatorio, esto fue basado en el trabajo de Ashcroft (1967). En términos de sistemas de cola lo anterior se puede expresar como M/D/1.
- El tiempo de servicio y retorno constante (caso determinista), es decir D/D/1.

El autor evidenció, a partir de modelos simples de simulación de sistemas M/M/1, que el tiempo de espera en el servidor (WS) es solo función del número de camiones presentes en el sistema.

El modelo también considera la disponibilidad de los equipos de carguío y transporte. Por lo general estos valores son considerados constantes como un porcentaje de la flota nominal, sin embargo, se señala que la productividad pala – camión depende fuertemente de la oscilación que presenta esta disponibilidad en los equipos [9].

Luego la capacidad total de la mina se calculará como la suma del producto entre la probabilidad de tener disponible el par (X,Y) (donde X es el número de camiones disponibles e Y el número de palas disponibles) y la productividad que ese par (X,Y) genera.

Se señala que, inicialmente, en un estado no estacionario, todos los camiones estarán agrupados en torno a la pala para esperar ser cargados. Este es el caso que se puede dar, por ejemplo, al comienzo de un turno o tras un largo tiempo de receso de la mina. En este caso el primer camión en ser cargado se carga de inmediato, el segundo camión debe esperar al primero, el tercer camión debe esperar a que el segundo se cargue y así sucesivamente. Elbrond explica que esto puede darse una vez por turno y la expresión para calcular este tiempo de espera en la pala es:

$$WS_{NE} = \frac{1}{N} * TS * \sum_{n=2}^N (n - 1) \quad (15)$$

Donde:

- WS = Tiempo de espera en la pala (caso no estacionario)
- N = Número total de camiones
- n = Camión n-ésimo
- TS = Tiempo de carguío

Existen tres modelos de redes de cola diferentes:

- 1) Un servidor, n-clientes y un tiempo de retorno. Modelo que representa el viaje de un camión desde la frente de carguío hasta un botadero de lastre o pila ROM y luego se devuelve.

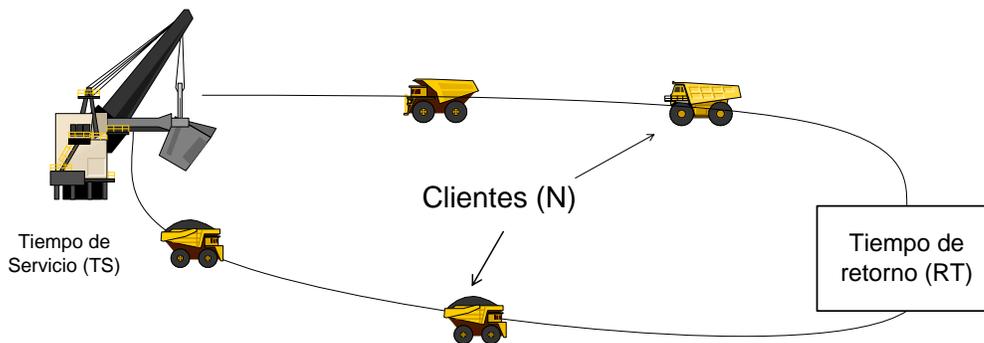


Ilustración 6: Sistema para una pala y un tiempo de retorno

- 2) 2 servidores (1 pala, 1 chancador), n-clientes. Modelo que representa un chancador cuyo origen es solo una frente de carguío.

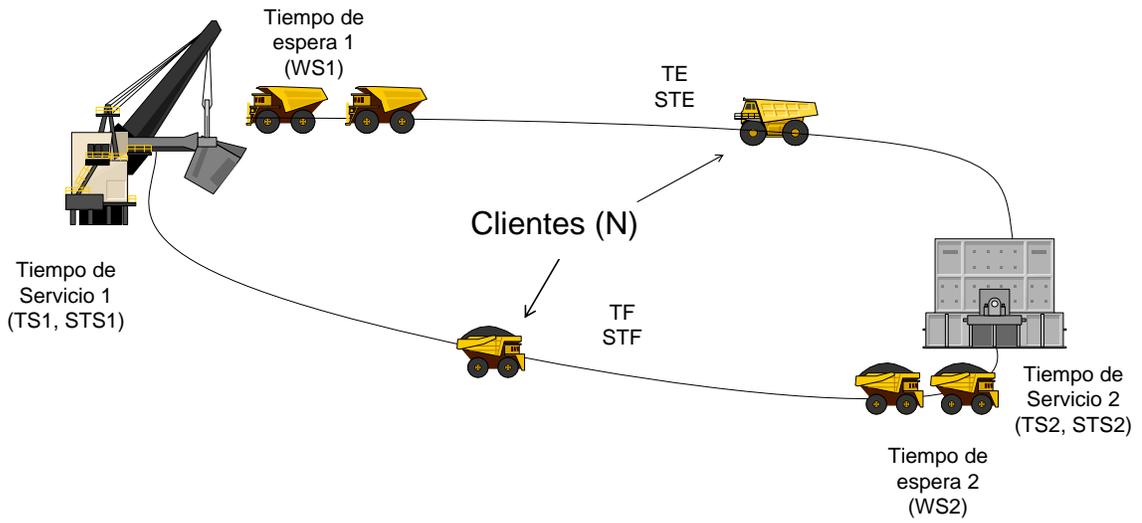


Ilustración 7: Sistema para 2 servidores en paralelo

- 3) N-servidores (1 chancador, N-1 Palas). Modelo que se acerca más a la realidad operativa dado que considera más fases alimentando el chancador.

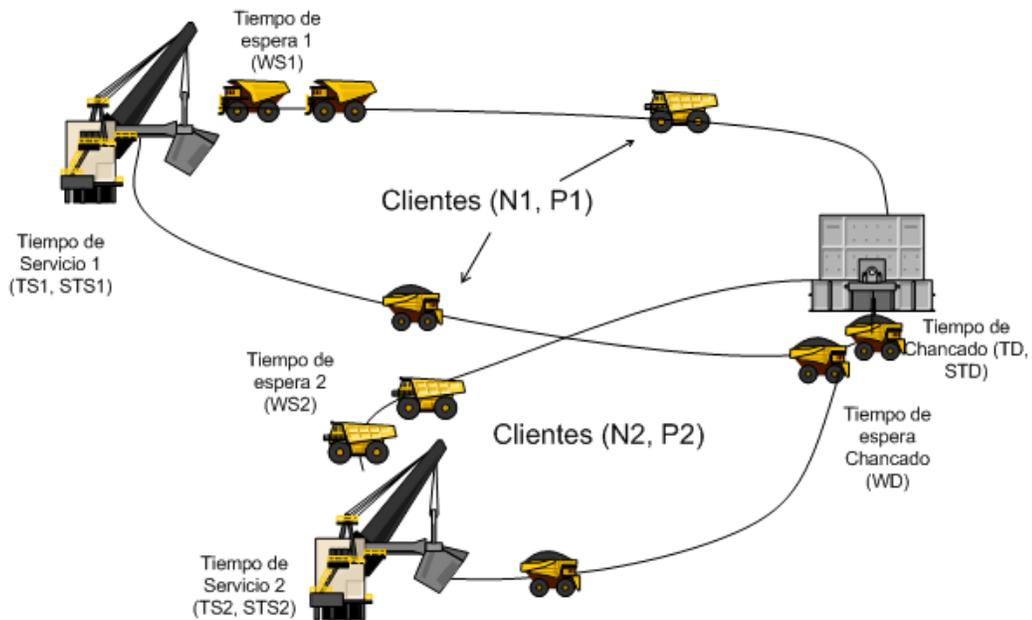


Ilustración 8: Sistema de varios circuitos con un servidor en común

La siguiente cita explica la forma de iterar para obtener los tiempos de espera en los servidores [10]:

“.. el tiempo de espera (WS1) en el primer servidor es calculado utilizando el tiempo de servicio (TS1) y el tiempo de retorno, que es conocido y es la suma del tiempo de viaje (TF) al segundo servidor, su tiempo de servicio (TS2) y el tiempo de viaje (TE) de regreso al primero servidor. La desviación estándar (STS1) del servicio es conocida y la desviación estándar del tiempo de retorno (SRT1) es estimada como la suma estadística de las desviaciones estándar de los componentes... El cálculo luego es aplicado al segundo servidor, donde el tiempo de espera (WS2) en el servidor es calculado utilizando el tiempo de servicio (TS2) y el tiempo de retorno (RT2), que es ahora conocido como la suma del tiempo de viaje al primer servidor (TE), la espera en el primer servidor recientemente calculada (WS1), el tiempo de servicio (TS1) y el tiempo de regreso (TF). La desviación estándar del tiempo de servicio (STS2) es conocida y la desviación estándar del tiempo de retorno (SRT2) se calcula al igual que SRT1 considerando la desviación estándar del tiempo de espera en el servidor 1, que se asume igual al tiempo de espera.

Este procedimiento luego se repite para calcular el nuevo tiempo de espera utilizando el segundo servidor en el tiempo de retorno.”

Las expresiones que permiten calcular el tiempo de espera en el servidor (WS) = f(WP, TS, STS, WA, SRT, WB, RT) son las siguientes:

$$WS = WP * \frac{STS}{TS} + 2 * WA * \left(1 - \left(\frac{STS}{TS}\right)\right) * \frac{SRT}{RT} + WB * \left(1 - \left(\frac{STS}{TS}\right)\right) * \left(1 - 2 * \frac{SRT}{RT}\right) \quad (16)$$

$$\rho P = 1 - \left[1 + \sum_{n=1}^N \prod_{i=1}^n \{(N - i + 1) * k\}\right]^{-1} \quad (17)$$

$$\rho A = \left[1 + \{N * k * (1 + \sum_{n=1}^N \prod_{i=1}^n (N - i) * \frac{e^{ki} - 1}{i})\}\right]^{-1} \quad (18)$$

$$WP = N * \frac{TS}{\rho P} - (TS + RT) \quad (19)$$

$$WA = N * \frac{TS}{\rho A} - (TS + RT) \quad (20)$$

$$WB = N * TS - (TS + RT) \quad (21)$$

Dónde:

- TS (TD): Tiempo de servicio
- STS (STD): Desviación estándar del tiempo de servicio
- RT: Tiempo de retorno
- SRT: Desviación estándar del tiempo de retorno
- N: Número de clientes
- $K = TS/RT$
- ρP : Factor de utilización de Palm (1947)
- ρA : Factor de utilización de Ashcroft (1957)
- WP : Tiempo de espera de Palm
- WA : Tiempo de espera de Aschcroft
- WB : Tiempo de espera constante
- WS: Tiempo de espera en servidor ajustado
- TF: Tiempo de viaje lleno
- TE: Tiempo de viaje vacío
- STF: Desviación estándar del viaje lleno.
- STE: Desviación estándar del viaje vacío
- N, N1, N2: Número de camiones del circuito
- P1, P2: Proporción de la producción total que se mueve en ese circuito

En las observaciones utilizadas para la interpolación de las esperas WP, WA y WB los radios STS/TS y SRT/RT son del orden de 0.3. Un radio igual a 0 indica que no hay aleatoriedad y el caso es determinista.

Una vez estimado los tiempos de pérdidas en cola, se procede a calcular la capacidad de la mina, para ello se procede de la siguiente forma:

- 1) Se calcula el tiempo de espera en servidores en función del número de camiones, para cada circuito.
- 2) Si aplica, considerar también el caso no estacionario
- 3) Se calcula el tiempo de ciclo promedio del circuito
- 4) Se construye una matriz con las palas y camiones disponibles con la capacidad que este par podrían producir y la probabilidad que tal número de equipos se encuentre disponible. Se calcula la suma-producto entre producción y probabilidad y se calcula la capacidad de la mina en términos de tonelaje por unidad de tiempo.

2.5. Ajuste de datos

El ajuste de datos a una distribución de probabilidad es un paso importante en la elaboración de modelos de simulación o teoría de colas. Es en esta etapa donde se aplica la variabilidad al sistema, pasando del uso de un valor constante como en el caso determinista a un valor aleatorio con una distribución de probabilidad [11].

2.5.1. Definiciones

Variable aleatoria: Una variable aleatoria discreta X es una función que asigna valores numéricos a los sucesos elementales de un espacio muestral.

Variable aleatoria continua: Una variable aleatoria es continua cuando tiene asociada una función de densidad $f(x)$ que cumple:

$$f(x) \geq 0, \forall x \text{ donde esté definida} \quad (22)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad (23)$$

La probabilidad se determina con:

$$P(a < x < b) = \int_a^b f(x)dx \quad (24)$$

Función de distribución: Es la aplicación de $F_x(x)$ que asigna a cada valor x de la variable aleatoria X la probabilidad de que la variable tome valores menores o iguales que x .

$$F_x(x) = P(X \leq x) \quad (25)$$

2.5.2. Determinación del tipo de distribución de un conjunto de datos

Al tener una serie de datos, estos se pueden ajustar a una distribución de probabilidad, lo que agrupará los datos históricos en una variable aleatoria. De esta manera, parámetros que se utilizaban constantes en el cálculo determinístico de flotas ahora pasa a ser un valor aleatorio.

Esto se puede determinar mediante las pruebas de Chi – cuadrado, Kolmogorov – Smirnov y Anderson – Darling.

2.5.3. Test de Chi cuadrado

Se trata de un test de hipótesis a partir de una serie de datos. El test se basa en calcular un estadístico de prueba y compararlo con un valor conocido como valor crítico, que se obtiene por lo general de tablas. El procedimiento es:

- 1) Obtener al menos 30 datos de la variable a estudiar
- 2) Calcular la media y varianza de los datos
- 3) Crear un histograma de $m = \sqrt{n}$ intervalos, donde n es el número de datos, y obtener la frecuencia observada O_i de cada intervalo
- 4) Establecer la hipótesis nula, proponiendo una distribución de probabilidad que se ajuste a la forma del histograma
- 5) Calcular la frecuencia esperada, E_i , a partir de la función de probabilidad que se ajuste.
- 6) Calcular el estadístico de prueba como:

$$c = \sum_{i=1}^m \frac{(E_i - O_i)^2}{E_i} \quad (26)$$

- 7) Definir el nivel de significancia de la prueba, α , y determinar el valor crítico de la prueba, $\chi_{\alpha, m-k-1}^2$
- 8) Comparar el estadístico con el valor crítico. Si el estadístico de la prueba es menor no se puede rechazar la hipótesis nula.

2.5.4. Test de Kolmogorov - Smirnov

Este test también permite determinar la distribución de probabilidad de una serie de datos, pero solo para variables continuas. El procedimiento general es:

- 1) Obtener al menos 30 datos de la variable a estudiar
- 2) Calcular la media y varianza de los datos
- 3) Crear un histograma de $m = \sqrt{n}$ intervalos, donde n es el número de datos, y obtener la frecuencia observada O_i de cada intervalo
- 4) Calcular la probabilidad observada en cada intervalo $PO_i = O_i/n$.
- 5) Acumular las probabilidades PO_i para obtener la probabilidad observada hasta el i -ésimo intervalo, POA_i
- 6) Establecer la hipótesis nula, proponiendo la distribución de probabilidad que se ajuste al histograma
- 7) Calcular la probabilidad esperada acumulada para cada intervalo PEA_i , a partir de la función de probabilidad propuesta.
- 8) Calcular el estadístico de prueba:

$$C = \max|PEA_i - POA_i| \quad i = 1, 2, 3, \dots, k, \dots, m \quad (27)$$

- 9) Definir el nivel de significancia de la prueba, α , y determinar el valor crítico de la prueba, $D_{\alpha,n}$
- 10) Comparar el estadístico con el valor crítico. Si el estadístico de la prueba es menor no se puede rechazar la hipótesis nula.

2.5.5. Test de Anderson - Darling

Este test también permite determinar la distribución de probabilidad de una serie de datos, pero solo para distribuciones normal, lognormal, exponencial, log-logística, Weibull y de valor extremo tipo I, además es muy sensible a valores extremos. El procedimiento general es:

- 1) Obtener “n” datos de la variable a estudiar
- 2) Calcular la media y varianza de los datos
- 3) Organizar los datos en forma ascendente: $Y_i \quad i = 1, 2, \dots, n$
- 4) Ordenar los datos en forma descendente: $Y_{i+1} \quad i = 1, 2, \dots, n$
- 5) Establecer la hipótesis nula, proponiendo la distribución de probabilidad que se ajuste al histograma
- 6) Calcular la probabilidad esperada acumulada para cada número Y_i , $PEA(Y_i)$, y la probabilidad esperada acumulada para cada número $PEA(Y_{n+1-i})$ a partir de la función de probabilidad propuesta.
- 7) Calcular el estadístico de prueba:

$$A_n^2 = -\left[n + \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (2i - 1) [\ln (PEA(Y_i)) + \ln (PEA(Y_{n+1-i}))]\right] \quad (28)$$

- 8) Definir el nivel de significancia de la prueba, α , y determinar el valor crítico de la prueba, $a_{\alpha,n}$
- 9) Comparar el estadístico con el valor crítico. Si el estadístico de la prueba es menor no se puede rechazar la hipótesis nula.

3. Metodología

El objetivo es resolver la problemática de las redes de cola mediante el modelo propuesto por Elbrond. El modelo será construido y calibrado a partir de los datos reales de la mina Radomiro Tomic.

Se modelarán dos tipos de redes:

- “N” palas alimentando un único chancador
- Red pala – depósito de lastre sin interacción con un segundo servidor

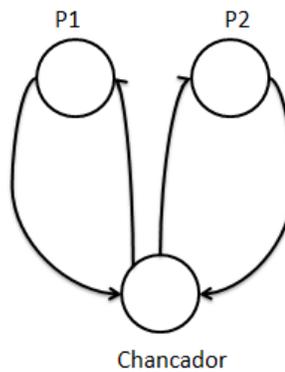


Ilustración 9: Red pala - chancado



Ilustración 10: Red pala - lastre (stock)

Para la construcción de estas redes se requiere conocer los tiempos que están involucrados en el ciclo del camión, la producción de cada red (en toneladas por día) y el número de camiones involucrados en el transporte de material. Con estos valores, el modelo, basado en teoría de colas, entrega el tiempo de espera en cola de los camiones en los servidores de carguío y chancado.

3.1. Problema a resolver

El problema a resolver es la estimación del tiempo en que los camiones permanecen en cola esperando ser atendidos tanto en carguío como en chancado.

La construcción los modelos de redes de cola estará basada en los datos de entrada necesarios para resolver las ecuaciones de teoría de cola: tiempo entre llegadas y tiempo de servicio, lo cual está dado por los tiempos de viaje del camión entre servidores y por el tiempo de carga y descarga de éste.

El objetivo de los modelos estocásticos es estimar el tiempo de espera por cola en carguío y chancado, para posteriormente agregar ese tiempo de pérdida operacional al cálculo tradicional de flota de equipos y luego re-estimar el número de camiones.

La estimación de tiempo entre llegadas requiere del conocimiento de cada ruta y del número de equipos asociados a esta, para ello se utilizarán los datos obtenidos del plan de producción del proyecto sulfuros RT fase 2 para el año 2018.

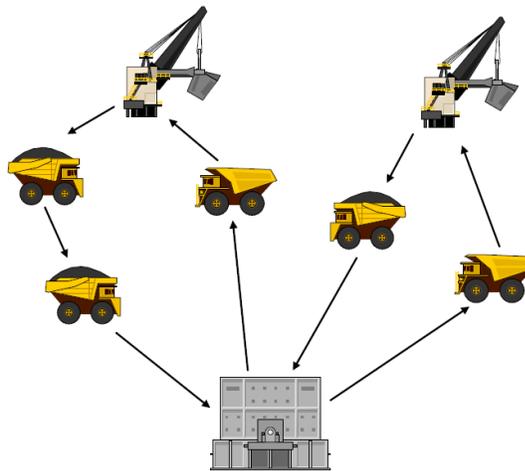


Ilustración 11: Redes de cola

Los modelos de redes de cola no suponen fallas de los equipos de carguío, transporte y de chancado (solo trabaja con flota efectiva), considera tiempos de viaje y atención fijos donde la aleatoriedad está dada por la desviación estándar de estos tiempos.

Los datos que se requiere para el modelamiento del sistema es el siguiente [18]:

- 1) Porcentaje de la flota total que se asignará a mineral y estéril
- 2) Número de chancadores y botaderos (o depósitos de material de baja ley - stocks)
- 3) Porcentaje de la producción asociada a cada destino
- 4) Tiempos de carguío y descarga promedio y la desviación estándar de éstos.

- 5) Tiempos de viaje lleno y vacío
- 6) Número y duración de interrupciones durante un turno
- 7) La duración de la espera inicial en una pala posterior a una larga interrupción (caso de espera no estacionaria)
- 8) La capacidad de cada camión

Los resultados a obtener serán:

- 1) Número promedio de camiones por pala
- 2) Tiempo de ciclo promedio
- 3) Tiempo total de ciclos y tonelaje producido por unidad de tiempo para cada destino
- 4) Flota necesaria para cumplir el plan de producción diario

3.2. Recolección de datos

Previo a la construcción de los modelos es importante dar revisión a la base de datos con la que se validará, para ello se estudiará el comportamiento del ciclo del camión en función de los equipos de carguío, equipos de transporte y rutas.

De esta base de datos se obtienen datos de entrada para el modelo, como son el tiempo de carguío para cada tipo de pala/camión, los tiempos de acuatamiento en carguío y descarga, y la velocidad de los camiones en función del porcentaje de pendiente de la ruta, con la cual se construirá un modelo de velocidades.

De los datos de Jigsaw se extrae también el tonelaje movido por cada pala, tonelaje de alimentación a chancadores y movimiento total mina, valores utilizados en la etapa de validación del modelo.

3.3. Programación del modelo

Las iteraciones propuestas por Elbrond pueden ser directamente modeladas en planillas Excel ®. Sin embargo el hecho de que puedan ser programadas mejora el tiempo de cálculo, permitiendo de esta manera probar un mayor número de casos en un menor tiempo. Para la programación se utiliza Macros de Excel, una herramienta que permite automatizar las funciones de Excel, programando las operaciones a través del lenguaje Visual Basic (VBA).

3.4. Validación del modelo

La validación se realizará con el modelo del mes de septiembre del año 2012 para el cual se cuenta con los datos reales. Se escogerán 4 días del mes de septiembre, para los cuales se cuenta con el plan diario de producción.

Con el modelo construido se procede a la etapa de estudio de variables y el error que arrastra, para ello, se modela todo con la data real, lo que arrojará el modelo intrínseco del modelo, posteriormente se irá reemplazando variables de entrada por datos de planificación hasta llegar al plan minero. Este procedimiento entrega el impacto de las fuentes de error del modelo.

3.5. Aplicación del modelo al caso de estudio

Para finalizar esta investigación se debe resolver las redes de cola para estimar los tiempos de espera en los servidores de carguío y descarga mediante el modelo de Elbrond para el año de estudio. Se utilizan los datos proporcionados por la división Radomiro Tomic de Codelco en su plan para el año 2018 obtenido del proyecto de expansión, del cual se obtiene el número de equipos mina para el año, las diferentes rutas para los camiones de extracción y el tonelaje a extraer para cada tipo de material.

La información de entrada será un plan anual mensualizado, del cual se generarán 4 planes diarios promedio, para 4 meses seleccionados, con los que se construirán las redes para el estudio. Con la información obtenida de los experimentos se recalculará el tiempo de ciclo de los camiones y se calculará la flota necesaria para satisfacer la producción planificada, este valor será comparado con el entregado por el proyecto que se calculó con la metodología tradicional.

4. Modelo de redes de cola

El presente capítulo tiene como objetivo resolver el problema planteado mediante el uso de las redes de cola propuesto por Elbrond. El modelo se construirá a partir de datos reales de producción y planificación, y una vez calibrado se procederá a modelar el caso de estudio que consiste en el modelamiento de cuatro meses del año 2018: Febrero, Junio, Octubre y Diciembre.

4.1. Modelo de calibración

Para la utilización de un modelo en un caso de estudio éste debe estar calibrado. La metodología de calibración es modelar un evento ya pasado, del que se tiene datos reales, y ajustar diferentes parámetros tal de alcanzar resultados similares. Para este caso en particular se decidió modelar cuatro días del mes de septiembre de 2012.

Durante el mes de septiembre de 2012, la mina contaba con cuatro fases activas: Fases 16, 17, 20 y 32. Para el modelo se considera además un movimiento mina asociado a la remoción de ripios desde las pilas de lixiviación hasta los botaderos destinados a éstos y un movimiento asociado a la alimentación de la línea de procesamiento de óxidos de material chancado en una pequeña planta llamada Brotec.

La fase 16 se encuentra localizada al sureste del rajo principal y en el mes de septiembre solo alimenta el chancador de óxidos. La fase 17 se encuentra ubicada al norte del rajo, y alimenta tanto la planta de óxidos como el chancador de sulfuros, mineral que a su vez alimenta la planta concentradora de Chuquicamata. La fase 20 es parte de la explotación de las zonas superficiales al sur del rajo y alimenta solo la planta de óxidos, mientras que la fase 32 pertenece a los sectores más profundos del rajo principal, donde la mineralización es principalmente de sulfuros, alimentando el chancador de sulfuros y stock interior mina.

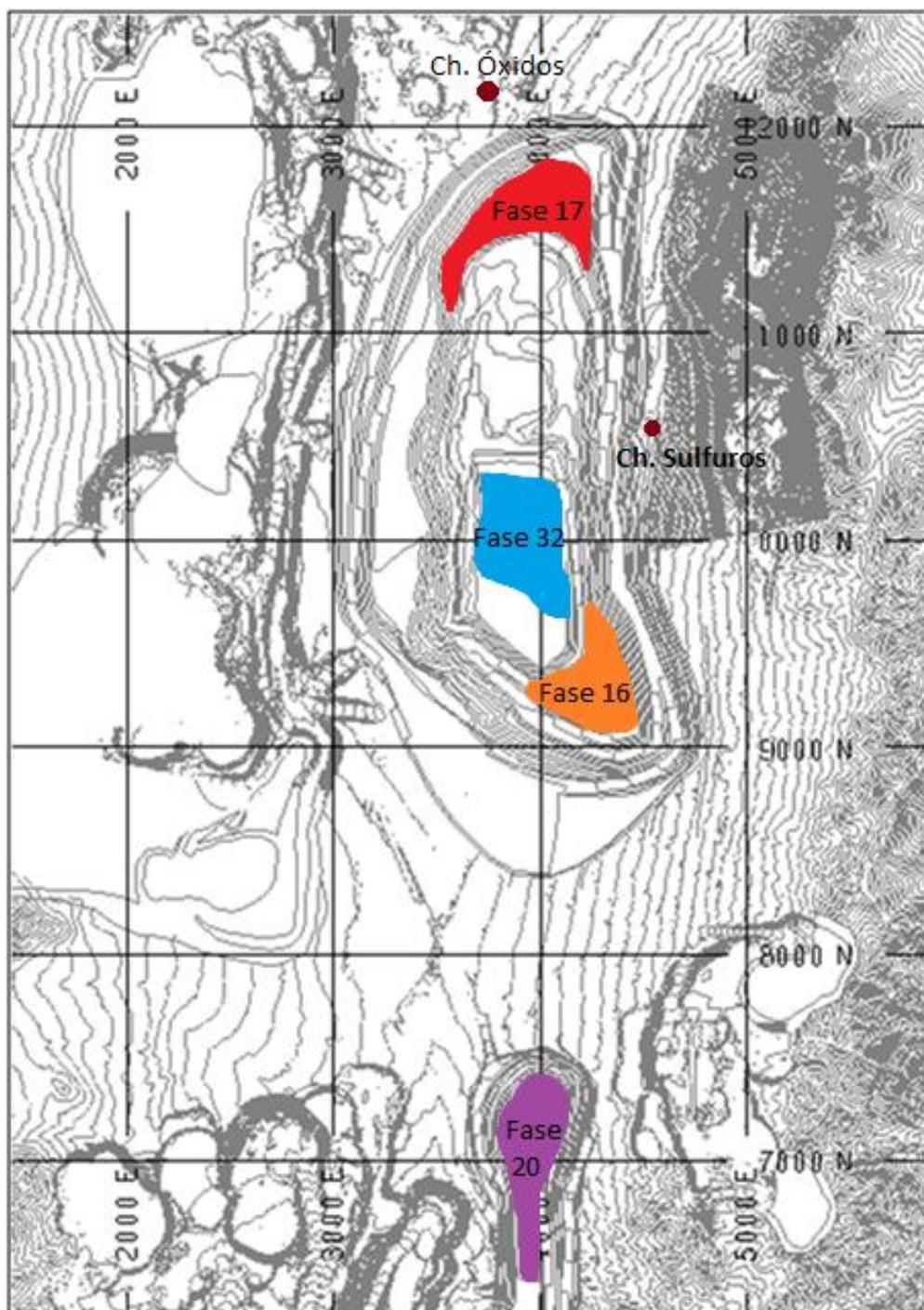


Ilustración 12: Layout de RT, Septiembre 2012

4.1.1. Plan minero – Septiembre 2012

Un resumen del movimiento mina y alimentación a las diferentes plantas de beneficio se puede ver en la Tabla 2 e Ilustración 13:

Tabla 2: Plan minero Septiembre 2012

	Fase 16	Fase 17	Fase 20	Fase 32	Pilas	Brotec
Ch Sulf	767,987	-	-	822,010	-	-
Ch Ox	1,380,471	2,098,849	1,711,186	-	-	600,000
Otros	2,025,435	6,913,576	2,579,828	195,000	1,170,000	-
Total	4,173,893	9,012,424	4,291,014	1,017,010	1,170,000	600,000

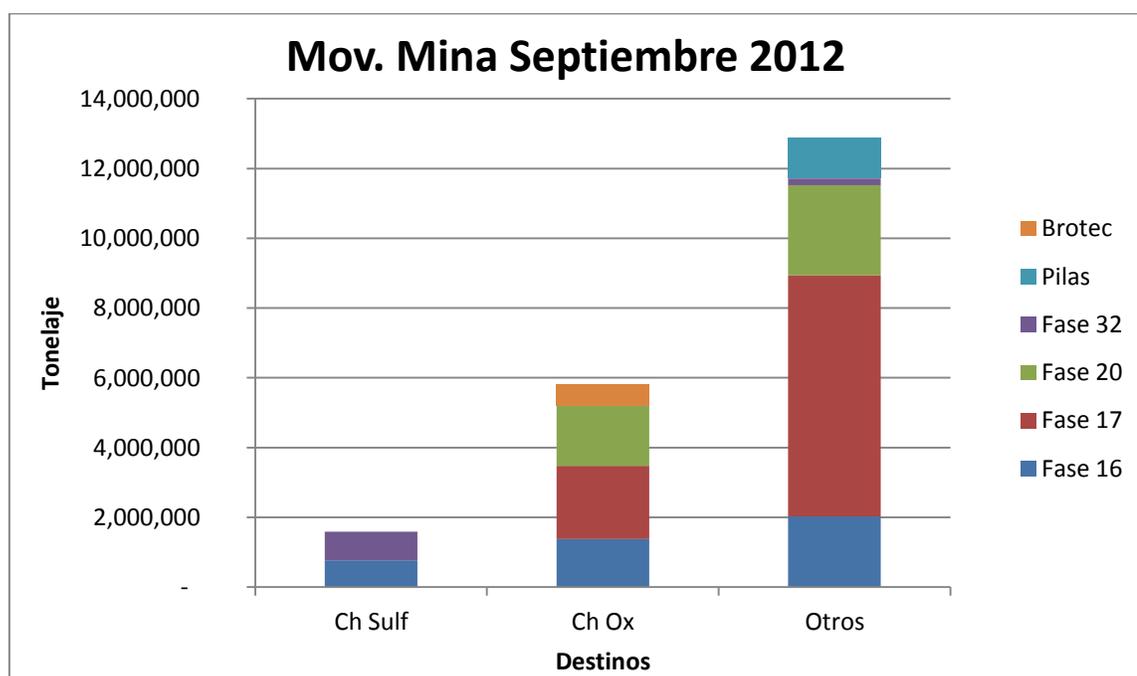


Ilustración 13: Movimiento mina septiembre 2012

Se entiende por desarrollo a todos destinos que no son chancadores, en este caso en particular el desarrollo está compuesto de:

- OBL: Óxidos de baja ley, depositados en pilas ROM de lixiviación
- SBL: Sulfuros de baja ley, hasta ahora sin proceso asociado
- Lastre
- Ripios de lixiviación
- Stock de baja ley, para óxidos y sulfuros

Para este plan mensual la distancia media fue de 5.6 kilómetros, de los cuales un 42.6% correspondía a tramos en pendiente.

4.1.2. Equipos de carguío y transporte – Septiembre 2012

Durante el mes de septiembre el equipo de carguío de la mina Radomiro Tomic consistía en: Palas de cable, palas hidráulicas y cargadores frontales. Mientras que el equipo de transporte se componía de seis flotas. La Tabla 3 y Tabla 4 resumen los equipos de carguío y transporte nominales.

Tabla 3: Equipos de transporte, Septiembre 2012

Equipos	Unidad	Tamaño	#
Komatsu 930 - E	ton	299	52
Liebherr T282 B	ton	327	17
Liebherr T282 C	ton	363	13
Trepsa 1 Kom 730	ton	190	4
Trepsa 2 Kom 730	ton	190	7
CAT 795 - F	ton	313	2
TOTAL CAMIONES			95

Tabla 4: Equipos de carguío, Septiembre 2012

Equipos	Unidad	Tamaño	#
PH4100 XPA	yd ³	58	3
PH4100 XPB	yd ³	73	3
PH4100 XPCAC	yd ³	73	3
PC 8000	yd ³	50	1
O&K RH 200	yd ³	34	1
O&K RH 340	yd ³	44.5	1
CF L1850	yd ³	40	2
CF L2350	yd ³	53	3
TOTAL PALAS			17



Ilustración 14: Carguío y transporte en RT

4.1.3. Selección de días a modelar

El modelo fue propuesto para modelar la productividad de un turno o un día. Para verificar la validez de éste a un mes, y luego a un año, se modelarán 4 días del mes de septiembre, evitando así alguna situación extrema que se pueda dar con un día en particular.

Los días seleccionados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Movimiento real mina, septiembre 2012

	8 de sept	9 de sept	21 de sept	22 de sept
Ch. Óxido (ton)	211,688	189,701	167,148	175,364
Ch. Sulfuro (ton)	61,553	17,469	42,046	48,242
Movimiento mina (ton)	693,991	648,017	686,069	694,567

4.1.4. Recolección de datos

Parte fundamental de la construcción del modelo es la recolección de datos que alimentarán a este. La data fue filtrada de acuerdo a criterios físicos y expertos, es decir, respetando los tiempos mínimos de diseño en caso de carga y descarga, criterio experto en los aculatamientos y para las velocidades se respetó según la información del PND 2012. Los filtros aplicados para las componentes del tiempo de ciclo de camión fueron:

Tabla 6: Filtros en componentes del ciclo

Componente	Unidad	Mínimo	Máximo
Carguío	min	1.5	10
Descarga	min	0.3	5
Aculatamiento	min	0.3	3
Velocidad	km/h	5	50

El sistema minero a modelar corresponde al ciclo de un camión en una mina a cielo abierto, donde las componentes involucradas en el ciclo son: tiempo de carguío, tiempo de viaje, tiempo de descarga, aculatamiento en carguío y aculatamiento en descarga. Estas variables serán representadas por su valor medio y la desviación estándar, forma en que el modelo requiere los datos.

La recolección de información se hace a partir de la base de datos del sistema Jigsaw del mes de septiembre. Los datos recolectados son para camiones Komatsu 930, esto pues la mayoría de los camiones pertenecen a esta flota y seguirán predominando en el año 2018, y para el modelamiento del caso de data real se recolectó información de camiones Liebherr y Trepsa.

Los datos recolectados fueron:

- Tiempo de aculatamiento y carguío para cada equipo de carguío.
- Tiempo de aculatamiento y descarga para cada destino.
- Tiempo en cola, para cada equipo de carguío y cada chancador.
- Velocidad cargado y descargado.

Los siguientes histogramas muestran, para la semana 1, el tiempo de carguío realizado por una pala 4100 XPA, el tiempo de descarga en el chancador de óxidos y el tiempo de aculatamiento tanto en chancador como en la pala. Los histogramas de las semanas restantes se adjuntan en el anexo A.2.

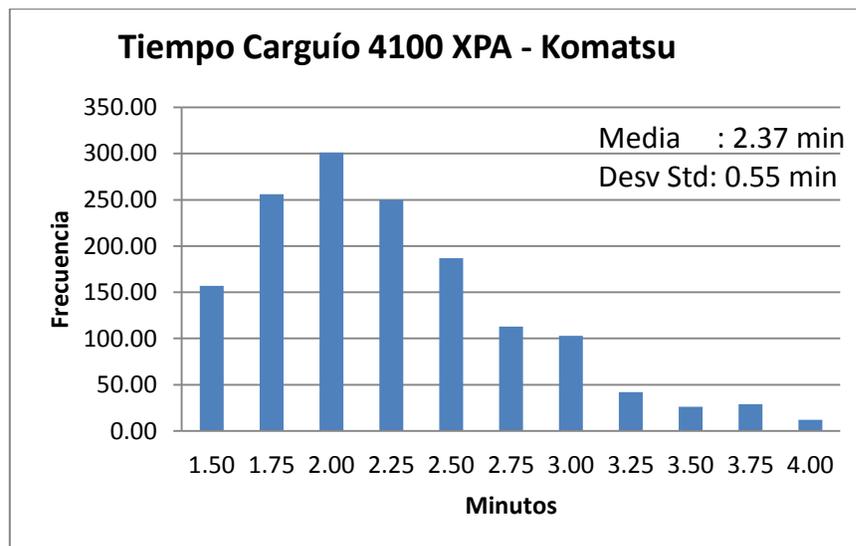


Ilustración 15: Histograma de tiempos de carguío - 4100 XPA - Komatsu

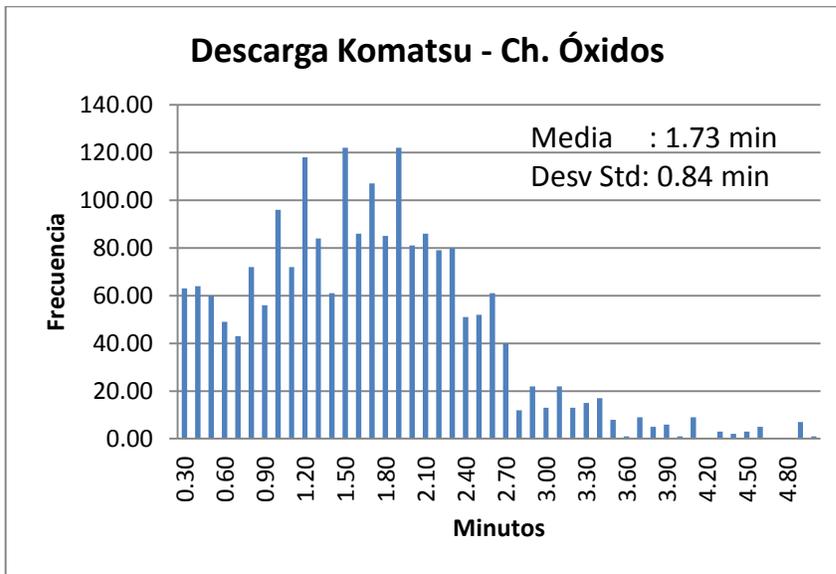


Ilustración 16: Histograma descarga - Komatsu - Chancador de óxidos

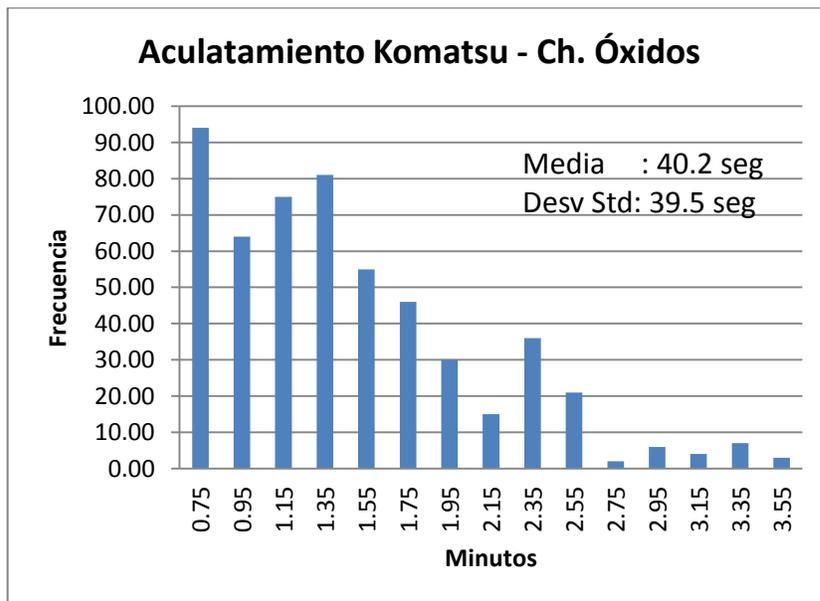


Ilustración 17: Histograma de aculatamiento - Komatsu - Chancador de óxidos

Un importante factor a considerar en el tiempo de ciclo es la velocidad de los camiones, dado que el tiempo de viaje es el mayor componente del tiempo de ciclo. Como una manera de poder representar de mejor manera la realidad, se construyó un modelo de velocidades, tanto para camión cargado como para camión vacío. A partir de los datos de Jigsaw se construye un modelo de la velocidad en función del porcentaje del tramo en que hay pendiente. Se considera que un tramo está en pendiente si ésta sobrepasa el 4%.

El modelo de velocidades se construye a partir de los datos de Jigsaw del mes de septiembre, solo para camiones Komatsu.

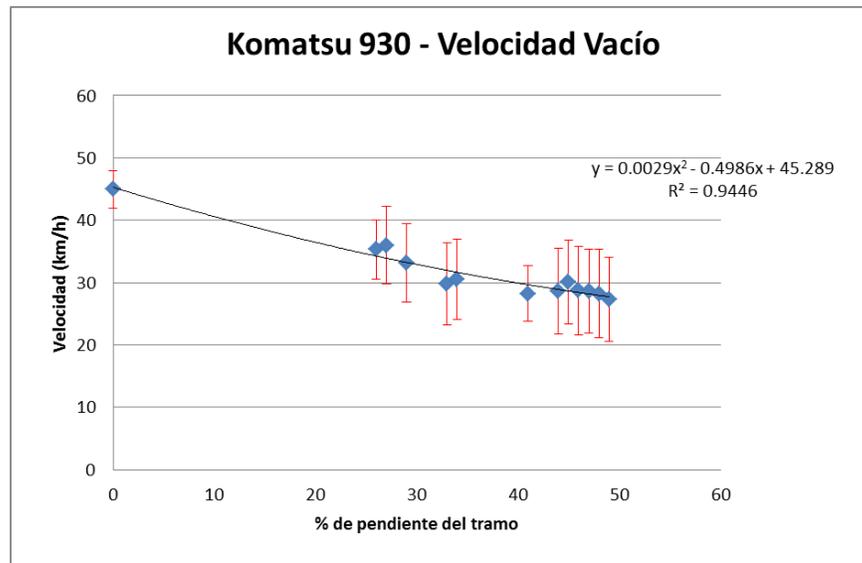


Ilustración 18: Modelo de velocidades Komatsu vacío

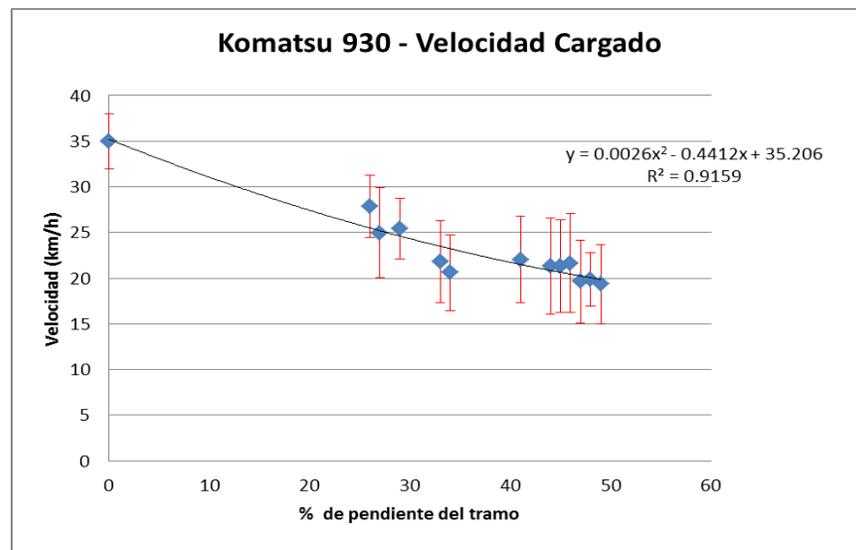


Ilustración 19: Modelo de velocidades Komatsu cargado

4.1.5. Planes mineros diarios

Con los tiempos de ciclo del camión definidos, faltaría conocer: El plan minero, la distancia de cada circuito y la ubicación de cada equipo de carguío en la mina. Con estos datos es posible estimar el número de camiones necesarios para cumplir el plan en cada circuito de la mina.

El tiempo de ciclo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_{Ciclo} = TA_{pala} + TC + TVC + TA_{Ch} + TD + TVC \quad (29)$$

Donde:

- TA = Tiempo de acuatamiento en pala y/o chancador (si aplica)
- TC = Tiempo de carguío
- TD = Tiempo de descarga
- TVV = Tiempo de viaje vacío
- TVC = Tiempo de viaje cargado,

El número de camiones efectivos requeridos para cada circuito se estima como:

$$\#Camiones = \frac{Ton\ a\ Mover}{\frac{60}{T.Ciclo} * Cap\ Efectiva\ Camion * Horas\ operacionales} \quad (30)$$

Las horas operacionales dependerán, del chancador o de la pala, según el tiempo de espera que se esté estimando.

El plan diario es construido por la Superintendencia Planificación y Desarrollo Minero Metalúrgico- GRMD, en el área de planificación de corto plazo. El plan se construye en base al plan semanal y al avance diario de la mina. Un ejemplo del plan de corto plazo se aprecia en la Ilustración 20, donde se observa la planificación diaria del banco 2600 de la fase 32 de sulfuros, indicando, para cada polígono, qué equipo está planificado y a qué ritmo de producción.



Ilustración 20: Polígonos de plan de corto plazo, fase 32

Los planes diarios se pueden apreciar en las siguientes figuras y tablas, detallando el origen, destino, equipo de carguío y la distancia tanto en pendiente como horizontal.

Tabla 7: Plan diario de producción, 8 de Septiembre de 2012

Pala	Origen	Destino	Destino	Plan	Dist Pend	Dist Hor
C218	Brotec	Ch. Ox	Ch. Ox	10,000	822	1,425
P203	2780 F16	Ch. Ox	Ch. Ox	65,000	3,226	2,834
P204	2885 F20	Ch. Ox	Ch. Ox	40,000	1,952	5,538
P210	2840 F17	Ch. Ox	Ch. Ox	75,000	1,855	2,235
P716	Brotec	Ch. Ox	Ch. Ox	10,000	822	1,425
P201	2600 F32	Ch. Sulf	Ch. Sulf	50,000	4,477	4,752
P710	2600 F32	Ch. Sulf	Ch. Sulf	9,000	4,477	4,752
P202	2885 F17	Bot Norte	Otros	40,000	2,329	2,311
P205	2810 F16	OBL	Otros	70,000	3,031	3,813
P211	2855 F17	OBL	Otros	86,000	2,349	2,840
P212	2885 F17	Bot Norte	Otros	75,000	2,329	2,311
P209	2915 F20	Bot Sur	Otros	50,000	1,846	2,180
P715	Pila 3 Ripios	Bot Ripios	Otros	45,000	333	684
P708	Pila 3 Ripios	Bot Ripios	Otros	45,000	333	684
Total				670,000	2,256	2,731

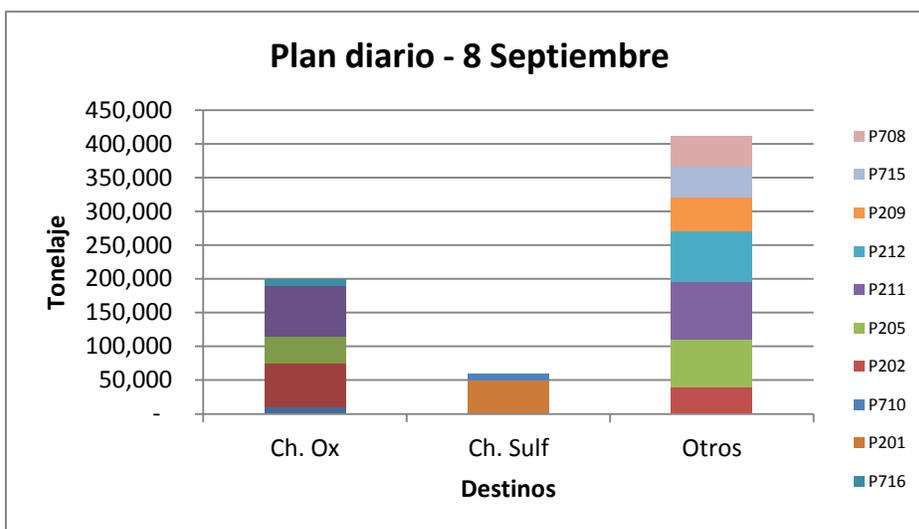


Ilustración 21: Plan diario de producción, 8 de Septiembre de 2012

Tabla 8: Plan diario de producción, 9 de Septiembre de 2012

Pala	Origen	Destino	Destino	Ton	Dist Pend	Dist Hor
P204	2885 F20	Ch Ox	Ch Ox	45,000	1,952	5,538
P205	2810 F16	Ch Ox	Ch Ox	60,000	2,751	3,213
P210	2840 F17	Ch Ox	Ch Ox	75,000	1,855	2,235
C218	Brotec	Ch Ox	Ch Ox	10,000	822	1,425
P716	Brotec	Ch Ox	Ch Ox	10,000	822	1,425
P201	2600 F32	Ch Sulf	Ch Sulf	50,000	4,477	4,752
P710	2600 F32	Ch Sulf	Ch Sulf	9,000	4,477	4,752
P202	2885 F17	Bot Norte	Otros	40,000	2,329	2,311
P203	2795 F16	Brotec	Otros	65,000	3,068	3,906
P708	Ripios	Ripios	Otros	65,000	684	333
P211	2885 F17	OBL	Otros	86,000	2,349	2,840
P212	2855 F17	Bot Norte	Otros	70,000	2,329	2,311
P209	2915 F20	Bot Atravesio	Otros	50,000	1,996	2,180
P715	Ripios	Ripios	Otros	35,000	684	333
Total				670,000	2,236	2,706

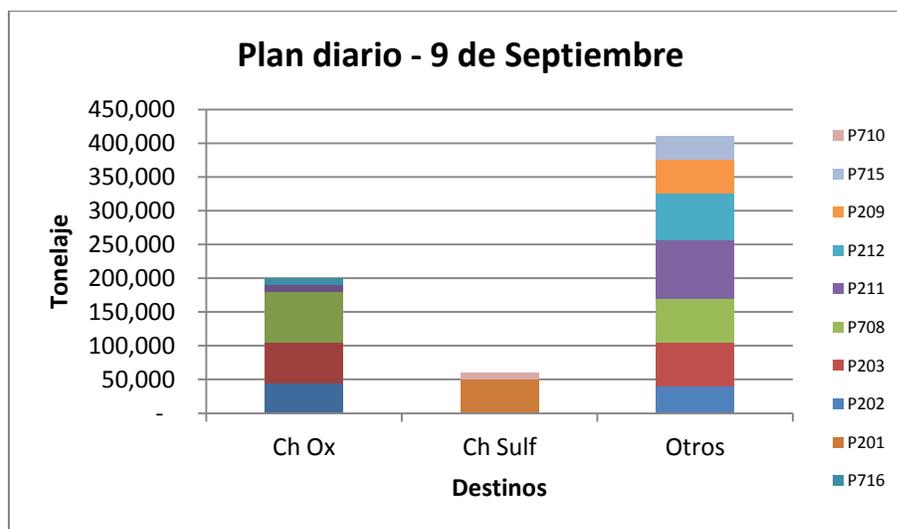


Ilustración 22: Plan diario de producción, 9 de Septiembre de 2012

Tabla 9: Plan diario de producción, 21 de Septiembre de 2012

Pala	Origen	Destino	Destino	Ton	Dist Pend	Dist Hor
C218	Brotec	Ch Ox	Ch Ox	10,000	822	1,425
P204	2885 F20	Ch Ox	Ch Ox	40,000	1,952	5,538
P205	2810 F16	Ch Ox	Ch Ox	65,000	2,751	3,213
P210	2840 F17	Ch Ox	Ch Ox	75,000	1,855	2,235
P715	Brotec	Ch Ox	Ch Ox	10,000	822	1,425
P714	2810 F16	Ch Sulf	Ch Sulf	60,000	3,460	3,909
P202	2885 F17	Bot. Norte	Otros	30,000	2,329	2,311
P203	2795 F16	Stock Brotec	Otros	60,000	2,920	3,805
P211	2870 F20	Bot. Norte	Otros	75,000	2,501	2,222
P212	2885 F17	OBL	Otros	75,000	2,499	2,840
P209	2915 F20	OBL	Otros	45,000	2,815	5,882
P208	Pila 3 Ripios	Bot. Ripios	Otros	70,000	333	684
P207	2615 F32	Sulf Int Mina	Otros	30,000	804	2,103
P206	2900 F17	Bot. Norte	Otros	30,000	2,501	2,222
Total				675,000	2,206	2,934

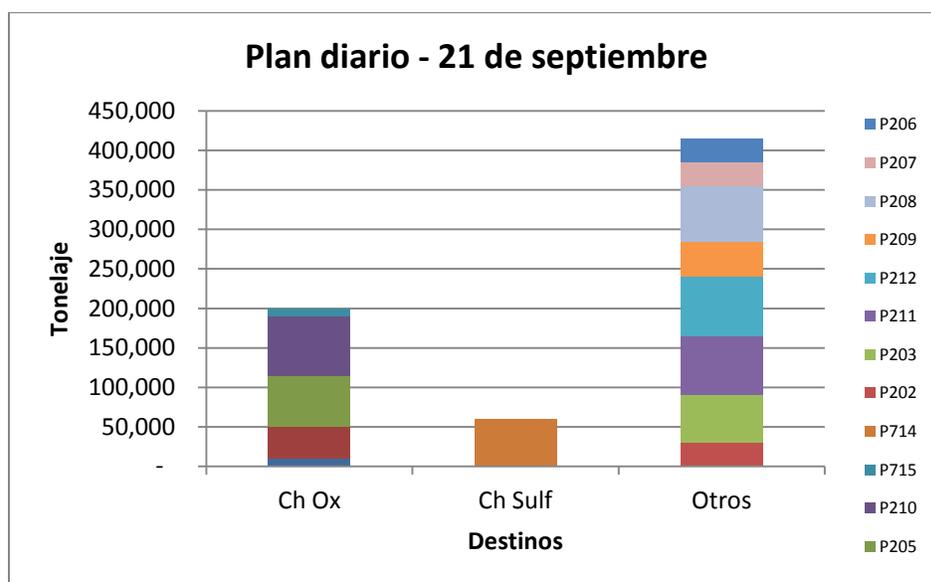


Ilustración 23: Plan diario de producción, 21 de Septiembre de 2012

Tabla 10: Plan diario de producción, 22 de Septiembre de 2012

Pala	Origen	Destino	Destino	Ton	Dist Pend	Dist Hor
C218	Brotec	Ch Ox	Ch Ox	10,000	822	1,425
P204	2885 F20	Ch Ox	Ch Ox	40,000	1,952	5,538
P205	2810 F16	Ch Ox	Ch Ox	65,000	2,751	3,213
P210	2840 F17	Ch Ox	Ch Ox	75,000	1,855	2,235
P715	Brotec	Ch Ox	Ch Ox	10,000	822	1,425
P714	2810 F16	Ch Sulf	Ch Sulf	60,000	3,460	3,909
P202	2885 F17	Bot. Norte	Otros	30,000	2,501	2,222
P203	2780 F16	Stock Brotec	Otros	60,000	2,920	3,805
P211	2885 F20	Bot. Norte	Otros	95,000	2,501	2,222
P212	2885 F17	OBL	Otros	95,000	2,146	2,179
P209	2900 F20	Bot. Atraveso	Otros	45,000	2,329	2,311
P207	2615 F32	Sulf Int Mina	Otros	30,000	804	2,103
P206	2900 F17	Bot. Norte	Otros	60,000	2,501	2,222
Total				675,000	2,357	2,777

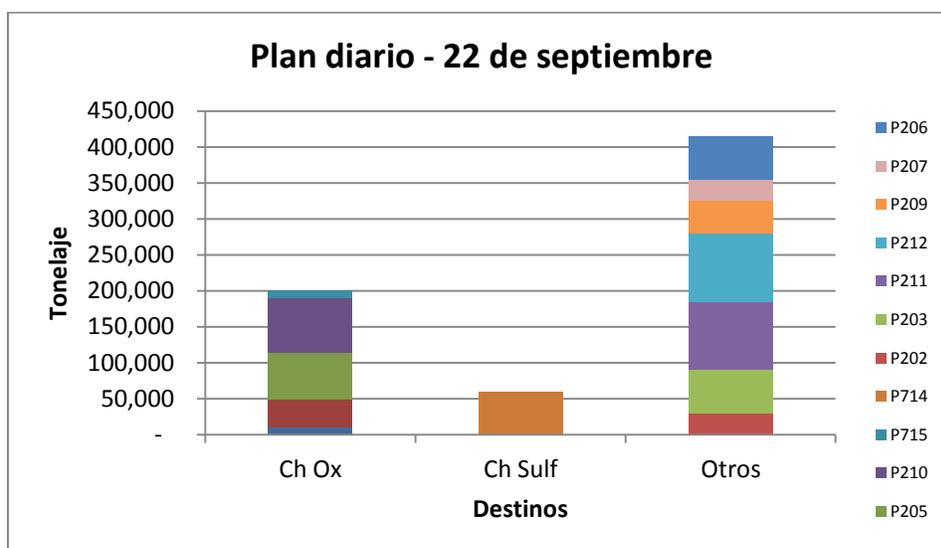


Ilustración 24: Plan diario de producción, 22 de Septiembre de 2012

4.1.6. Supuestos del modelamiento

El modelo para estimar el tiempo que los camiones permanecen en una cola durante el ciclo se basa en lo propuesto por Jorgen Elbrond en 1977. El modelo incorpora una serie de supuestos detallados a continuación:

- El modelo trabaja en estado estacionario, no existe la reasignación de camiones. Dado que el modelo no considera al camión como unidad básica,

si no que considera a la flota como un total, esta característica puntual no puede ser modelada.

- b) Las demoras programadas y no programadas, para equipos de carguío, transporte y chancado son iguales durante todos los días, lo que puede subestimar o sobreestimar la utilización de los equipos.
- c) Los parámetros de entrada se resumen a una media y una desviación estándar. No se considera la distribución de probabilidad asociada, por lo que la fenomenología detrás de estos eventos no es representada.
- d) Todos los equipos que pertenecen a una misma red funcionan el mismo número de horas al día.

Este último supuesto no será considerado, pues no todas las palas que alimentan un mismo chancador trabajan las mismas horas al día, por lo que el modelo diferenciará el cálculo de tiempos en cola para palas de mineral y para chancador.

La metodología utilizada será:

- Se estima primero el tiempo en cola del chancador (las iteraciones finales transforman todo a un circuito único equivalente).
- Con el tiempo de espera del chancador, se estima el tiempo de espera en cada pala de mineral individualmente.

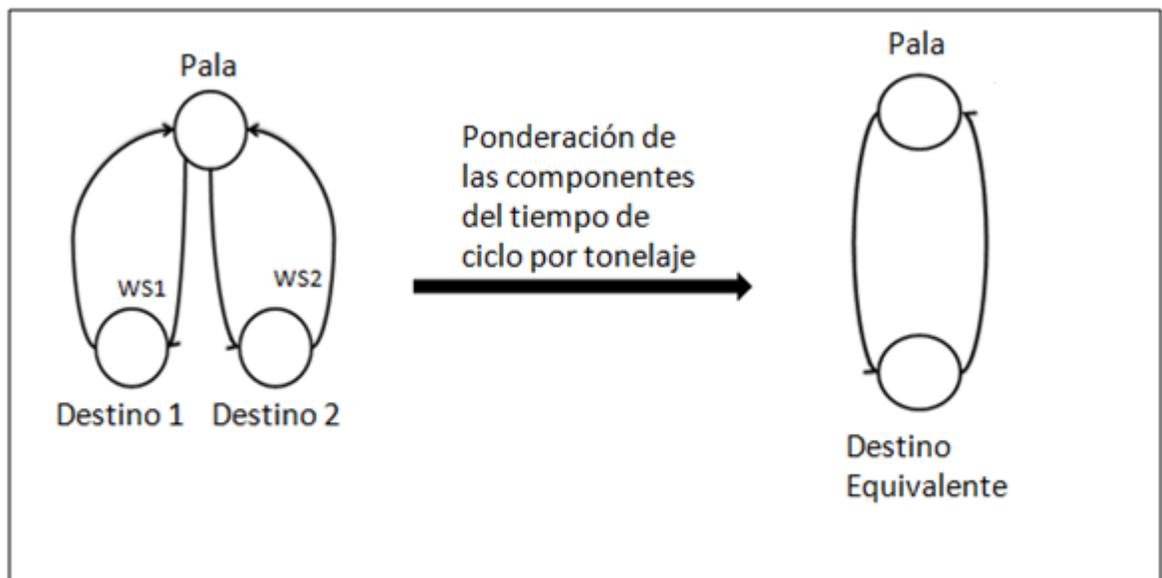


Ilustración 25: Ciclo equivalente - Palas

Esta metodología permite entre otras cosas que una pala pueda cargar varios destinos, pues el cálculo puede considerar un tiempo medio de retorno de los camiones al lugar de carguío.

Para el cálculo de las horas operacionales de cada equipo se utiliza como fuente de información el Plan de Negocios Divisional de Radomiro Tomic 2012 (PND 2012), desde allí se obtiene: disponibilidad de palas, reservas, demoras programadas (DP) y demoras no programadas (DNP). Las horas operacionales de cada pala se calculan de la siguiente manera:

$$HO = 24 * \%Disp * (100 - \%Reserva) - DP - DN \quad (31)$$

Una simplificación del modelo, al modelar el plan, es el uso del camión Komatsu 930-E como camión estándar, a excepción de los camiones cargados desde las pilas de lixiviación a los ripios y desde la planta Brotec, donde una correa alimenta mineral chancado a camiones Komatsu 730 (Trepesa) de 190-230 toneladas.



Ilustración 26: Camión Trepesa descargando en RT

4.1.7. Modelamiento

Para el modelamiento se construyeron inicialmente los diagramas de la planificación diaria para los cuatros días a modelar. El diagrama busca ejemplificar el funcionamiento de la mina para cada día, indicando las redes que se generan. A modo de ejemplo, se presenta en la Ilustración 28 el diagrama del día 21 de septiembre, perteneciente a la tercera semana del mes.

Los parámetros del modelo son los mismos que los parámetros de la teoría de colas: tiempo entre llegadas y tiempo de servicio. Para estimar esos parámetros se requiere una serie de datos de entrada, los componentes del tiempo de ciclo, quienes en

definitiva determinan el tiempo entre llegada. La Tabla 11 muestra todas las variables involucradas en el cálculo del tiempo de ciclo, el tiempo de atención o servicio también es parte del ciclo del camión.

El paso que sigue, es calcular el tiempo de ciclo para cada circuito de la mina, y con ello estimar el número de camiones, el elemento más importante dentro del modelo. La Tabla 11 muestra el cálculo de camiones para el circuito del chancador de óxidos del día 21 de septiembre.

Tabla 11: Cálculo de camiones, circuito chancador óxidos, 21 septiembre

Pala	Origen	Ton	Dist Pend	Dist Hor	% Pend	V. Carg	V. Vacío	TC
P204	2885 F20	40000	1952	5538	26%	24.80	34.29	1.76
P205	2810 F16	65000	2751	3213	46%	20.76	28.49	1.76
P210	2840 F17	75000	1855	2235	45%	20.88	28.72	1.46
C218	Brotec	10000	822	1425	37%	22.16	30.81	13.52
P710	Brotec	10000	822	1425	37%	22.16	30.81	4.12

Pala	TVC	TA Ch	TD	TVV	TA Carg	T. Ciclo	Prod CAEX	# Cam
P204	18.12	0.62	1.81	13.11	0.53	35.95	9,645.83	4.00
P205	17.24	0.62	1.81	12.56	0.53	34.52	10,045.79	6.00
P210	11.75	0.62	1.81	8.54	0.43	24.61	14,087.05	5.00
C218	6.08	0.62	1.81	4.38	0.58	26.99	8,260.27	1.00
P710	6.08	0.62	1.81	4.38	0.66	17.67	12,615.49	1.00

Donde:

- TC: Tiempo de carguío (min)
- TVC: Tiempo de viaje cargado (min)
- TA Ch: Tiempo de aculatamiento chancado (min)
- TD: Tiempo de descarga (min)
- TVV: Tiempo de viaje vacío
- TA Carg: Tiempo de aculatamiento en carguío (min)

Como se mencionó anteriormente, es importante separar los servidores para la estimación del tiempo en cola. La tabla anterior muestra el cálculo en función del chancador, que funciona las 24 horas del día con un 85% de disponibilidad. En caso de la estimación del tiempo en cola de un equipo de carguío se debe considerar el tiempo efectivo de operación que ese equipo tiene.

Según el PND 2012, todas las palas, con excepción de los cargadores frontales tienen un porcentaje de reserva de 7%, además se considera que las demoras programadas son de 75 minutos/turno por concepto de cambio de turno y colación. Las demoras no programadas para las palas es de 130 minutos/turno y para cargadores frontales de 67 minutos/turno.

Además se debe considerar la disponibilidad física de cada pala, lo que se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12: Disponibilidad mecánica de equipos de carguío

Pala	Disponibilidad %
PA201	78
PA202	76
PA203	76
PA204	78
PA205	78
PA206	85
PA207	82
PA208	82
PA209	81

Pala	Disponibilidad %
PA210	85
PA211	85
PA212	85
PA708	80
PA710	80
PA714	80
PA715	80
PA716	80

Donde las palas 708, 710, 714, 715 y 716 corresponden a cargadores frontales, las palas 207, 208 y 209 a palas hidráulicas y las demás a palas de cable.

Teniendo la estimación de camiones para cada red, se estima el tiempo de pérdida en cola a partir de las ecuaciones del modelo de Elbrond. Para la construcción del modelo se crea una Macros, que requiere como entrada las componentes del tiempo de ciclo, el tonelaje de cada circuito y el total de camiones.

Inputs		Elbrond	N	17	#camiones		
T. Carguío	14.1 min	T. Viaje Carg	6.08 min	Aculat Bot	0.62 min	Descarga	1.81 min
Std Carguío	10.46 min	Std Viaje Car	1.63 min	Std Aculat B	0.31 min	Std Descarga	0.86 min
T. Viaje Vaci	4.38 min	Aculat Pala	0 min	Tonelaje	10,000 ton	Pala	C218
Std Viaje Va	1.2 min	Std Aculat P	0 min			T. Carguío	13.52
						Std Carguío	10.46
						Aculat Pala	0.58
						Std Aculat P	0.19
T. Carguío	1.76 min	T. Viaje Carg	18.12 min	Aculat Bot	0.62 min		
Std Carguío	0.59 min	Std Viaje Car	4.22 min	Std Aculat B	0.31 min		
T. Viaje Vaci	13.64 min	Aculat Pala	0 min	Tonelaje	40,000 ton	Pala	204
Std Viaje Va	3.1652172 min	Std Aculat P	0 min			T. Viaje Vaci	13.11
						Std Viaje V	9.15
						Aculat Pala	0.53
						Std Aculat P	0.31
T. Carguío	1.76 min	T. Viaje Carg	17.24 min	Aculat Bot	0.62 min		
Std Carguío	0.59 min	Std Viaje Car	5.02 min	Std Aculat B	0.31 min		
T. Viaje Vaci	13.09 min	Aculat Pala	0 min	Tonelaje	65,000 ton	Pala	205
Std Viaje Va	3.8325579 min	Std Aculat P	0 min			T. Viaje Vaci	12.56
						Std Viaje V	3.82
						Aculat Pala	0.53
						Std Aculat P	0.31
T. Carguío	1.46 min	T. Viaje Carg	11.75 min	Aculat Bot	0.62 min		
Std Carguío	0.50 min	Std Viaje Car	3.4 min	Std Aculat B	0.31 min		
T. Viaje Vaci	8.97 min	Aculat Pala	0 min	Tonelaje	75,000 ton	Pala	210
Std Viaje Va	2.599423 min	Std Aculat P	0 min			T. Viaje Vaci	8.54
						Std Viaje V	2.57
						Aculat Pala	0.43
						Std Aculat P	0.39
T. Carguío	4.92 min	T. Viaje Carg	6.08 min	Aculat Bot	0.62 min		
Std Carguío	1.2692124 min	Std Viaje Car	1.63 min	Std Aculat B	0.31 min		
T. Viaje Vaci	4.38 min	Aculat Pala	0 min	Tonelaje	10,000 ton	Pala	714
Std Viaje Va	1.2 min	Std Aculat P	0 min			T. Carguío	4.12
						Std Carguío	1.22
						Aculat Pala	0.8
						Std Aculat P	0.35

Ilustración 27: Programa Macros para estimación de tiempo en cola

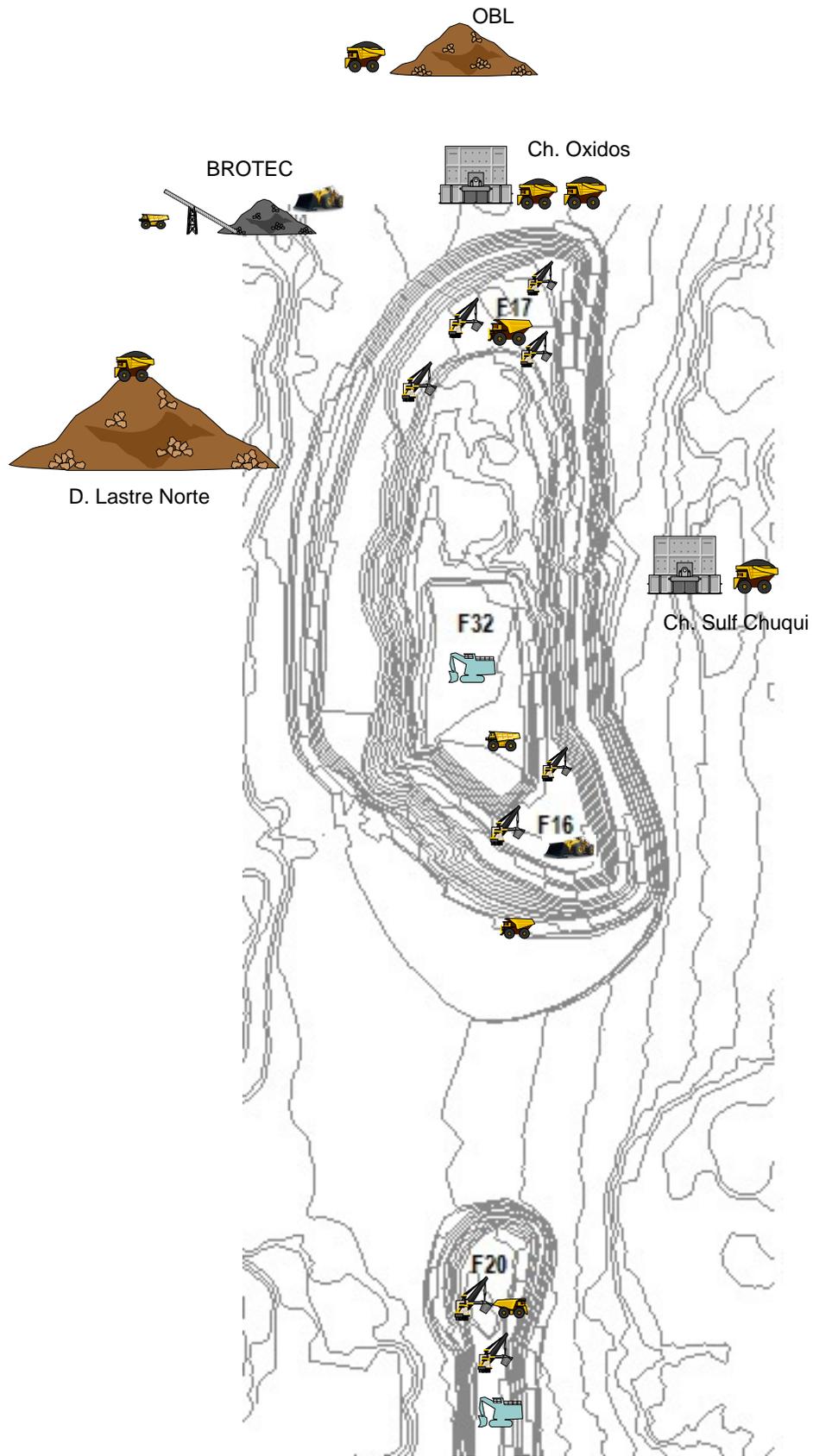


Ilustración 28: Diagrama de operación de semana 3, septiembre 2012

4.2. Resultados

Los resultados obtenidos del modelo son los tiempos de espera en cola para los equipos de carguío y para los chancadores.

Con este resultado, se obtiene un nuevo tiempo de ciclo medio para la mina y la baja en la producción respecto de la planificación minera. Estos resultados se comparan con los obtenidos desde la base de datos de Jigsaw.

4.2.1. Tiempos en cola

La salida del modelo, es el tiempo, en minutos, que esperan los camiones desde que arriban al servidor (pala o chancador) hasta que comienza la atención (carga o descarga). El tiempo de espera dependerá del tiempo de atención y de la tasa de llegadas al servidor, lo que está directamente ligado al número de camiones al circuito y al tiempo de ciclo. Los siguientes gráficos muestran los tiempos de espera modelados por ciclo y la diferencia con el tiempo real.

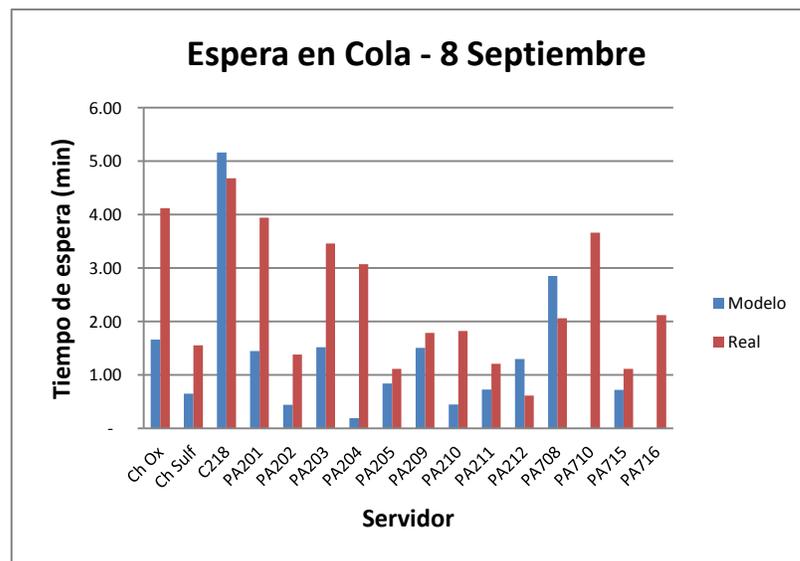


Ilustración 29: Esperas 8 de septiembre



Ilustración 30: Esperas 9 de septiembre



Ilustración 31: Esperas 21 de septiembre

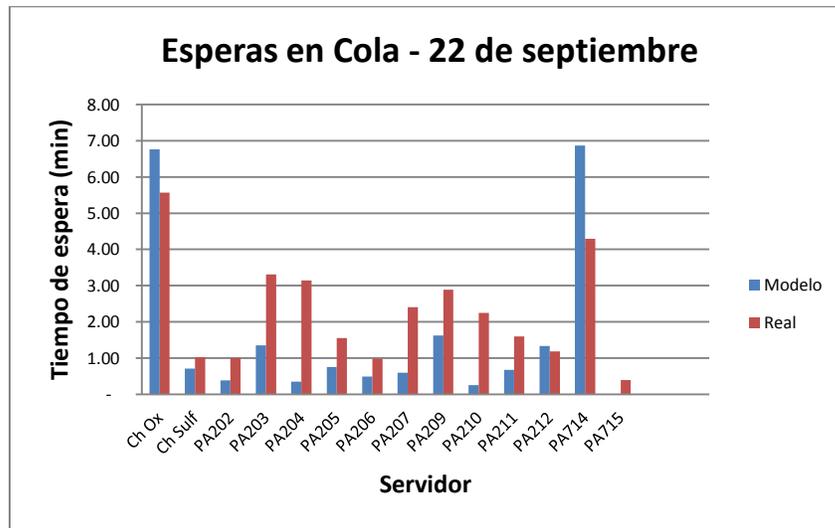


Ilustración 32: Esperas 22 de septiembre

Se observa que en todos los casos al menos un servidor no planificado operó, esto hace que se sobresature un servidor en el modelo generando grandes diferencias con la realidad en aquellas palas. Además se aprecia que el modelo tiende a subestimar los tiempos de espera, en especial para servidores “rápidos” que en este caso son las palas de cable. Una posible causa sería la diferencia de época en que el modelo fue creado y los factores empíricos de ajuste utilizados para los tiempos de servicio de la época.

El tiempo de espera medio del modelo y la diferencia con el tiempo real se puede apreciar en la tabla adjunta:

Tabla 13: Espera real vs espera modelo

Día	Real (mins)	Modelo (mins)	Dif. (seg)	Dif (%)
8	2.55	1.22	79.8	52.2%
9	3.05	1.83	73.2	40.0%
21	2.33	1.88	27.0	19.3%
22	2.80	2.48	19.2	11.4%
Promedio Pond.	2.68	1.85	49.46	30.8%

4.2.2. Producción y flota de camiones

El siguiente paso tras la estimación de los tiempos de cola en los servidores es ver la diferencia que se produce en el tiempo de ciclo para cada circuito. El aumento del tiempo de ciclo incide directamente en la producción diaria, viéndose esta reducida respecto de planificado.

El primer análisis es ver la diferencia al considerar los mismos parámetros de la planificación de largo plazo (PND 2012), reemplazando solo el valor del tiempo medio de cola por ciclo.

Tabla 14: Cálculo de camiones 2012

	Carguío	Viaje Vacío	Viaje Cargado	Aculat	Descarga	Cola
Año 2012 Planificado	2.58	6.99	17.36	1.00	1.00	1.00
Año 2012 Cola modelada	2.58	6.99	17.36	1.00	1.00	1.85

	Interferencia	Total	Ciclos/min	Product Hora (ton)	Disp %	Ut Op
Año 2012 Planificado	0.50	30.43	1.97	567.90	76.35%	72.53%
Año 2012 Cola modelada	0.50	31.28	1.92	552.47	76.35%	72.53%

	Dem/perd (min/turno)	Horas Ef	Tpd	UEBD	330 Eq	Producción
Año 2012 Planificado	144	13.93	7,908.5	76.0%	86	676,638
Año 2012 Cola modelada	144	13.93	7,693.5	76.0%	87	670,000

Se observa que se requiere aumentar en 1 el número de camiones para cumplir el plan de producción, como resultado de agregar los 0.85 minutos adicionales al tiempo de ciclo.

La mejora al considerar el tiempo de cola del modelo se muestra en la Tabla 15:

Tabla 15: Ciclo PND + Cola

Real (min)	PND (min)	PND + Cola (min)	Dif Real - PND	Dif Real - PND + cola
33.17	30.43	31.28	8.3%	5.7%

El modelo tiene menor error en la estimación del tiempo de ciclo total que el PND, sin embargo, se debe tener en cuenta que la componente de tiempo de cola, objetivo de este estudio, tiene un error de 31% respecto de la realidad.

4.2.3. Error del modelo

Con el objetivo de poder reducir el error de 31% del modelo de estimación de tiempo en cola se realizó el mismo estudio, para los 4 días en cuestión, sin embargo los parámetros de entrada del modelo fueron diferentes. Los pasos del estudio fueron:

- 1) Modelar los 4 días tomando como entrada la base de dato real (tiempos, velocidades, flotas de camiones, disponibilidad, tonelajes, origen – destino).

- 2) Utilizar en el modelo anterior solo camiones Komatsu, modificando todo lo asociado a éstos.
- 3) Modificar la data real de la velocidad de los camiones por la del modelo generado anteriormente.
- 4) Utilizar la disponibilidad de equipos de carguío del PND 2012.
- 5) Agregar a lo anterior el plan diario de producción (modelo original).

El objetivo es cuantificar el error que aporta cada variable al modelo, además, modelando el caso real se puede conocer el error intrínseco del modelo. Los resultados del modelo se observan en la Diferencias de esperas por variables Tabla 16 e Ilustración 33.

Tabla 16: Diferencias de esperas por variables

Día	Cola Real	Base	Camión	Velocidad	Disp Palas	Plan
8	2.55	2.01	1.94	1.96	1.55	1.22
9	3.05	2.05	2.10	1.84	1.41	1.83
21	2.33	1.71	1.63	1.34	1.32	1.88
22	2.80	2.29	2.42	2.38	2.15	2.48
Promedio	2.68	2.02	2.02	1.88	1.61	1.85

Dif %	24.7%	24.5%	29.7%	39.8%	30.8%
Dif en seg	39.72	39.30	47.70	63.93	49.46

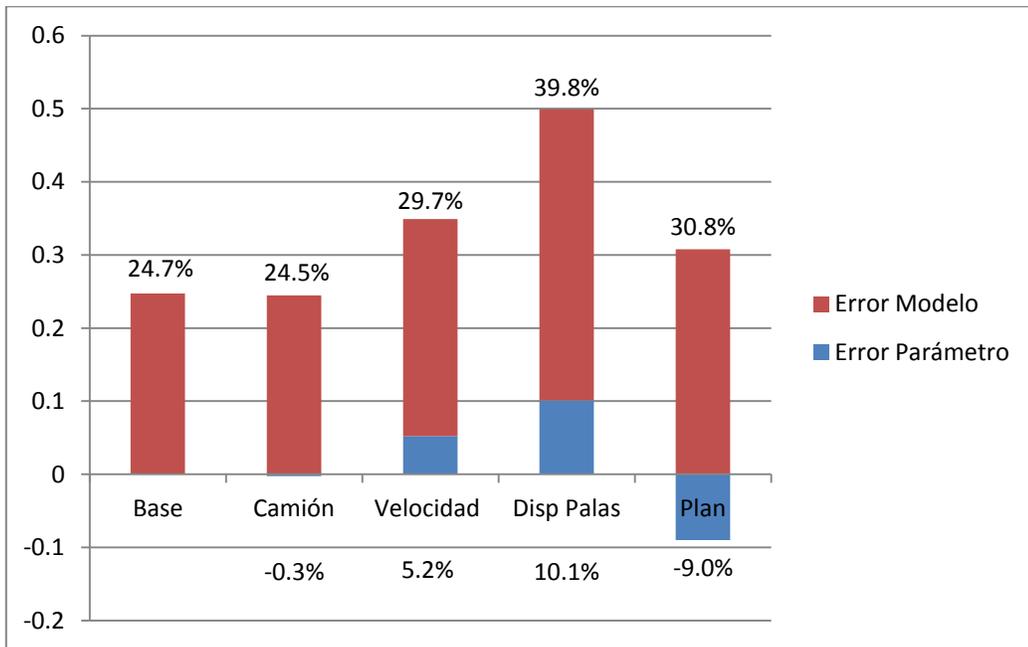


Ilustración 33: Error del modelo por variable

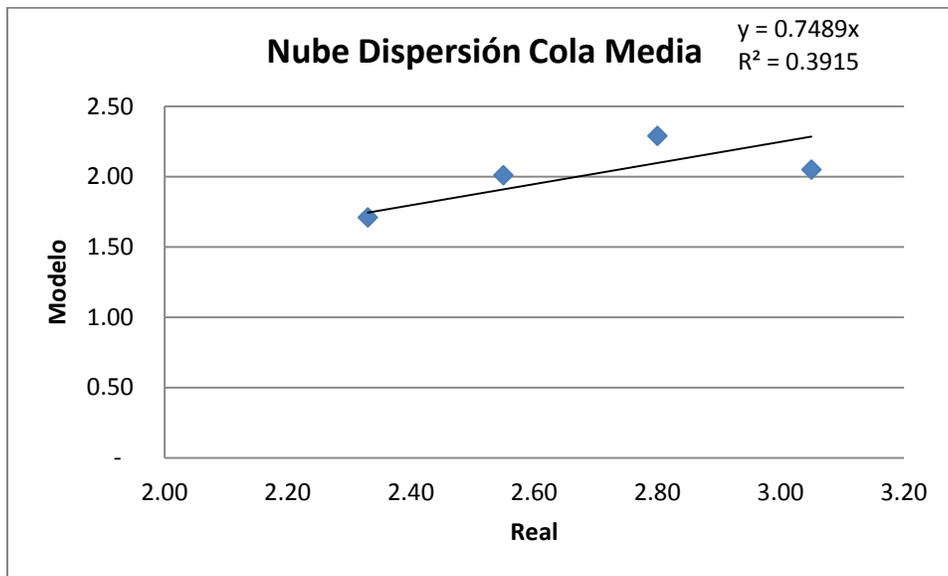


Ilustración 34: Nube de dispersión real vs modelo data real

El modelo tiene una diferencia de casi 40 segundos respecto a tiempo de cola real, al agregar las otras variables este error aumenta en 10 segundos, siendo el uso del camión equivalente la variable que menos afecta al error.

4.3. Caso de estudio

En esta etapa se aplica el modelo anterior a un caso de estudio futuro. El objetivo es poder predecir la baja en el cumplimiento del plan debido al tiempo que los camiones deben esperar en los servidores de carguío y chancado.

Durante el año 2018, se encontrará operativa la planta de sulfuros Radomiro Tomic, que cuenta con 2 chancadores primarios de 100 ktpd. Además, seguirá en funcionamiento la planta de óxidos y el chancador primario de sulfuros hacia Chuquicamata. El hecho de que todas las plantas estén operativas hace llamativo a este año en particular, pues se prevé alta complejidad en términos de manejo de materiales debido a que todas las plantas estarán trabajando a máxima capacidad.

En este año se encontrarán operativas las fases 21, 22, 24, 25, 33, 34 y 35, siendo las fases 22 y 33 las de mayor movimiento, la primera la que más aportará óxidos al proceso y la fase 33 la de mayor aporte a sulfuros, tanto a la planta propia como a la planta de Chuquicamata.

Otros materiales que se extraen de la mina durante este periodo son el lastre y el óxido de baja ley (OBL), que se deposita en pilas ROM en el sector norte de la mina y se procesa sin chancar.

La Ilustración 35 muestra la nueva planta de procesamiento de sulfuros y la Ilustración 36 un esquema de las rutas exterior mina para el año 2018.

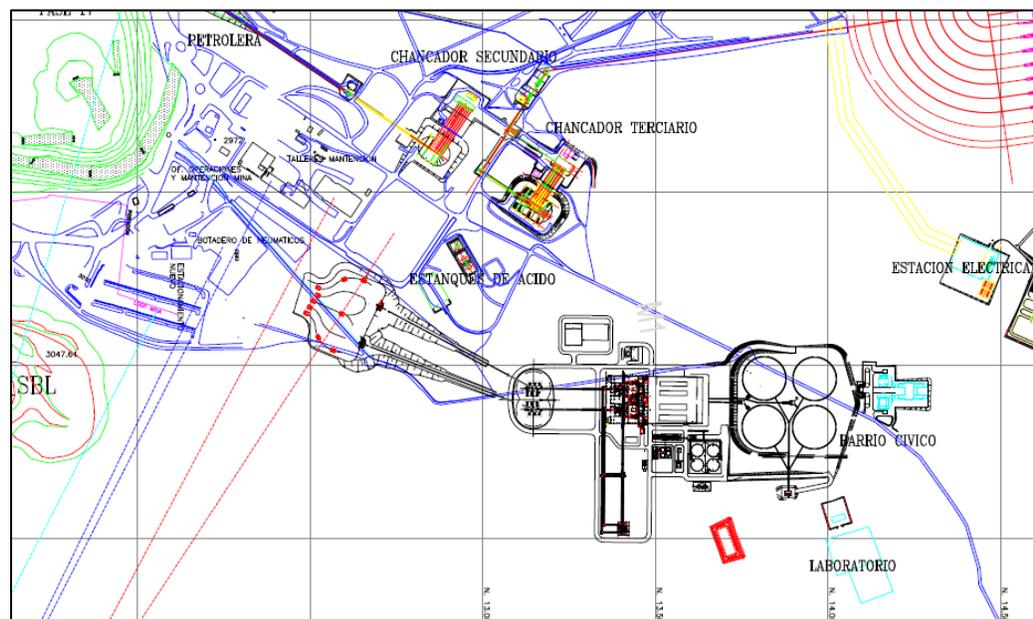


Ilustración 35: Layout planta de procesamiento de sulfuros RT

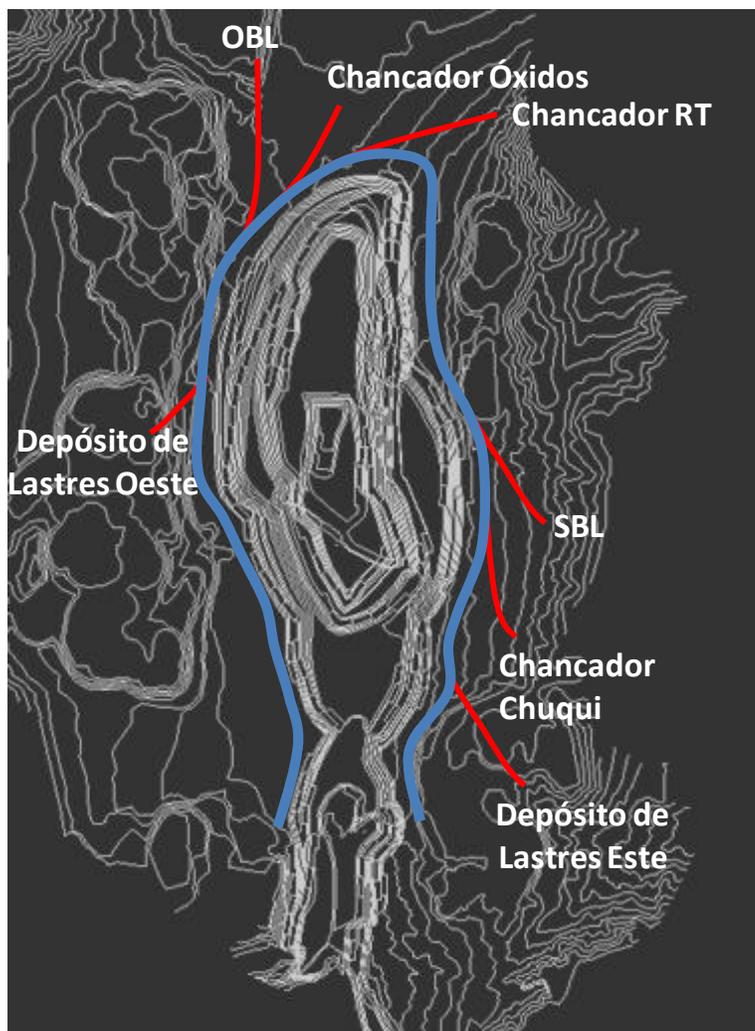


Ilustración 36: Layout mina RT, 2018

4.3.1. Plan Minero mensualizado 2018

El plan minero para el año 2018, a nivel de mes se puede ver en la Ilustración 37, donde se detalla cada destino posible: Heap Leach (Chancador de Óxidos), Planta RT, Planta Chuquicamata, Dump Leach (OBL) y Lastre. Durante este año no hay movimiento a stocks de baja ley.

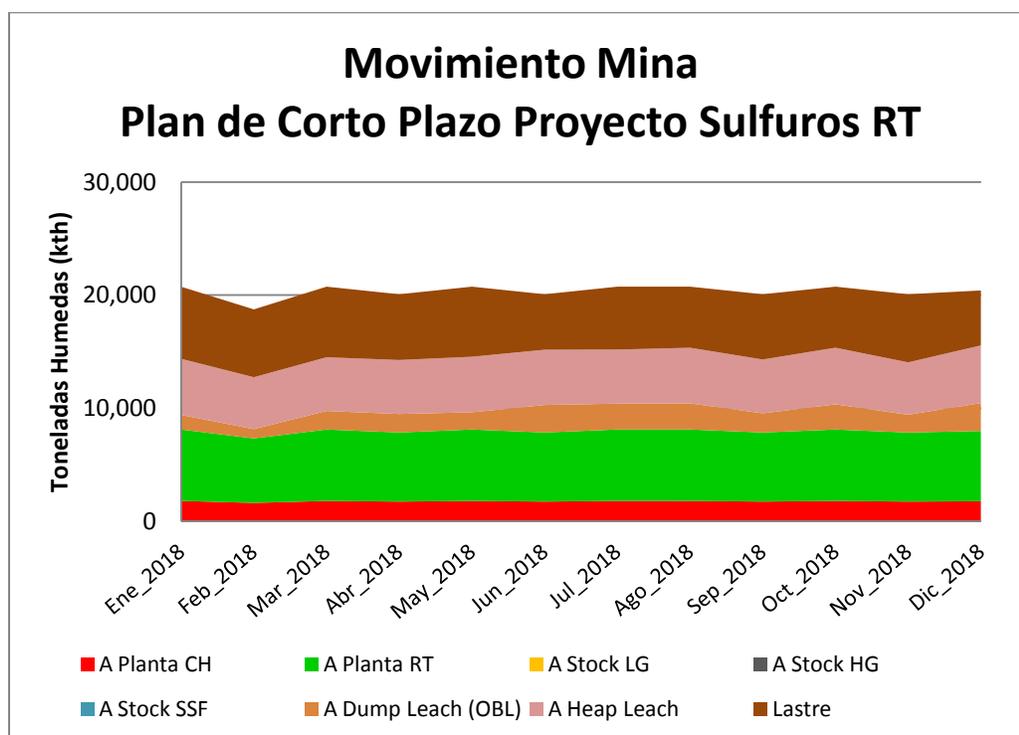


Ilustración 37: Plan minero mensualizado 2018

Se considera un movimiento diario promedio de 670,000 toneladas, saturando la capacidad de los chancadores de sulfuros RT, chancador de óxidos y manteniendo la cuota de alrededor de 69 ktpd para el chancador de Chuquicamata.

4.3.2. Equipos de carguío y transporte – 2018

Para el año 2018 la flota de equipos de carguío estimada es similar a la utilizada durante el mes de septiembre de 2012, con la diferencia que todas las palas poseen balde de 73 yd³, pues anteriormente 3 palas de cables utilizaban baldes de 58 yd³. Los equipos de transporte se reducen de seis flotas diferentes a dos, Komatsu 930-E y Liebherr T282. La Tabla 17 y Tabla 18 resumen los equipos de carguío y transporte nominales.

Tabla 17: Equipos de transporte, 2018

Equipos	Tamaño	Unidad	#
Komatsu 930 - E	299	ton	78
Liebherr T282 B	327	ton	27
TOTAL CAMIONES			105

Tabla 18: Equipos de carguío, 2018

Equipos	Tamaño	Unidad	Rendimiento	#
PH4100 XPB	73	yd ³	70-90 ktpd	7
PC 8000	50	yd ³	45-55 ktpd	2
CF L1850	36	yd ³	25-30 ktpd	2
CF L2350	50	yd ³	30-35 ktpd	2
TOTAL PALAS				13

La planificación mensual considera además en qué lugar se ubicará cada pala dentro del mes. Para lograr esta planificación se requiere conocer el rendimiento de cada equipo de carguío, tal como se describe en la Tabla 18. Según lo anterior, la capacidad de movimiento mina oscila entre los 690 y 870 ktpd.



Ilustración 38: Cargador Le Torneau 1850 operando en RT

4.3.3. Selección de meses a modelar

Simplificando el caso de estudio, se consideró solo 4 meses para modelar. Las razones que motivaron tal simplificación fueron:

- 1) Alimentación a chancadores relativamente constante durante el año (diferencias de miles de toneladas producto del número de días del mes). Es decir nunca un chancador está más congestionado que en otro mes.
- 2) Movimiento mina constante durante el año, lo que indica que las palas presentan igual grado de saturación todos los meses. Cuando hay bajas en los OBL hay aumento en el lastre, mientras que la alimentación a planta no varía.
- 3) El movimiento mina de las fases que más aportan al movimiento total (Fases 22, 25, 33, 34 y 35) tienen un ritmo casi constante a lo largo del año, esto sugiere que la distancia total ponderada mensual varía conforme la explotación de la mina y es representativa de esta. Es decir, las fases se explotan de forma equitativa.

Bajo estas condiciones, se modelarán 4 meses: Febrero, Junio, Octubre y Diciembre, que es cuando el chancador de óxidos presenta mayor uso. Se considerará un día promedio, donde el total mensual se dividirá entre el número de días del mes.

Con ello, los planes diarios, representativos del mes se muestran en la Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22 (todas las distancias en metros y tonelaje en toneladas métricas).

Tabla 19: Plan promedio diario, febrero 2018

	Equipo	Ton	Hor Pond	Pend Pond
Ch Óxidos	CF1(36yd3)	10,943	4,216	886
	CF3(50yd3)	2,072	4,754	3,856
	P1(50yd3)	29,475	5,416	3,244
	P2(50yd3)	12,420	5,780	1,909
	P1(73yd3)	1,699	1,190	3,591
	P2(73yd3)	5,893	4,754	3,861
	P3(73yd3)	14,990	1,643	1,173
	P4(73yd3)	6,480	4,216	802
	P5(73yd3)	42,588	4,216	952
	P6(73yd3)	36,702	4,216	952
Ch Sulf RT	CF3(50yd3)	23,190	4,823	4,765
	CF4(50yd3)	12,750	1,044	4,489
	P1(50yd3)	6,899	5,974	6,358
	P1(73yd3)	53,605	1,044	4,489
	P2(73yd3)	55,373	4,823	4,883
	P7(73yd3)	54,501	4,823	4,733
Ch Sulf Chuqui	CF3(50yd3)	6,997	4,170	4,388
	CF4(50yd3)	3,989	3,417	4,188
	P1(50yd3)	2,303	8,494	3,653
	P1(73yd3)	15,761	3,417	4,188
	P2(73yd3)	16,271	4,170	4,506
	P7(73yd3)	16,019	4,170	4,356
OBL	CF1(36yd3)	3,449	4,950	1,001
	P1(50yd3)	2,465	7,185	4,054
	P3(73yd3)	2,260	3,860	1,894
	P4(73yd3)	1,591	4,950	960
	P5(73yd3)	10,933	4,950	1,110
	P6(73yd3)	10,765	4,950	1,110
Lastre	CF1(36yd3)	16,504	2,998	3,348
	CF2(36yd3)	7,436	2,998	3,481
	P2(50yd3)	4,328	3,656	3,496
	P2(73yd3)	2,205	2,109	5,905
	P3(73yd3)	59,152	3,376	2,702
	P4(73yd3)	68,053	2,998	3,331
	P5(73yd3)	26,565	2,998	3,481
	P6(73yd3)	23,099	2,998	3,481

Tabla 20: Plan promedio diario, junio 2018

	Equipo	Ton	Hor Pond	Pend Pond
Ch Óxidos	CF2(36yd3)	12,518	4,216	1,312
	P2(50yd3)	44,858	5,967	2,282
	P3(73yd3)	2,351	1,643	1,473
	P4(73yd3)	28,377	4,216	1,252
	P5(73yd3)	29,945	4,216	1,252
	P6(73yd3)	43,487	4,216	1,402
	P7(73yd3)	2,902	5,723	4,670
Ch Sulf RT	CF3(50yd3)	20,685	5,954	5,326
	CF4(50yd3)	10,709	5,793	5,547
	P1(73yd3)	50,675	1,534	4,380
	P2(73yd3)	49,725	5,793	5,621
	P2(50yd3)	3,262	6,210	3,200
	P7(73yd3)	60,120	5,858	5,458
Ch Sulf Chuqui	CF3(50yd3)	6,303	3,730	5,245
	CF4(50yd3)	3,429	3,569	5,466
	P1(73yd3)	14,945	3,871	4,109
	P2(73yd3)	14,671	3,569	5,540
	P2(50yd3)	1,283	7,983	3,094
	P7(73yd3)	17,666	3,634	5,377
OBL	CF2(36yd3)	7,573	5,577	2,074
	P2(50yd3)	4,711	7,510	2,918
	P4(73yd3)	18,336	5,577	2,063
	P5(73yd3)	14,594	5,577	2,063
	P6(73yd3)	28,826	5,577	2,213
Lastre	CF1(36yd3)	21,615	3,376	3,002
	CF2(36yd3)	7,351	2,998	5,086
	P2(50yd3)	1,953	4,346	3,282
	P3(73yd3)	73,804	3,376	3,002
	P4(73yd3)	24,511	2,998	5,081
	P5(73yd3)	35,143	2,998	5,081
	P6(73yd3)	12,445	2,998	5,204

Tabla 21: Plan promedio diario, octubre 2018

	Equipo	Ton	Hor Pond	Pend Pond
Ch Óxidos	CF2(36yd3)	4,323	4,216	1,102
	CF4(50yd3)	5,004	1,653	3,501
	P1(50yd3)	30,441	5,457	2,161
	P2(50yd3)	21,694	5,967	2,132
	P1(73yd3)	18,109	1,653	3,501
	P4(73yd3)	19,912	4,216	1,102
	P5(73yd3)	28,151	4,216	1,102
	P6(73yd3)	31,767	4,216	1,102
	P7(73yd3)	5,063	6,082	3,880
Ch Sulf RT	CF1(36yd3)	6,701	6,151	4,757
	CF3(50yd3)	23,934	6,151	4,646
	CF4(50yd3)	10,056	1,534	4,380
	P1(73yd3)	40,792	1,534	4,380
	P2(73yd3)	63,617	6,151	4,757
	P7(73yd3)	59,371	6,151	4,730
Ch Sulf Chuqui	CF1(36yd3)	2,146	3,927	4,676
	CF3(50yd3)	7,112	3,927	4,565
	CF4(50yd3)	3,113	3,871	4,109
	P1(73yd3)	11,969	3,871	4,109
	P2(73yd3)	18,546	3,927	4,676
	P7(73yd3)	17,323	3,927	4,649
OBL	CF2(36yd3)	3,449	5,478	1,786
	P1(50yd3)	2,829	7,584	2,972
	P2(50yd3)	2,188	7,510	2,768
	P4(73yd3)	21,981	5,577	1,913
	P5(73yd3)	23,694	5,577	1,913
	P6(73yd3)	28,665	5,577	1,913
Lastre	CF3(50yd3)	2,675	4,036	5,101
	CF2(36yd3)	29,376	2,998	4,111
	P2(50yd3)	1,544	4,346	3,132
	P2(73yd3)	3,533	4,036	5,122
	P3(73yd3)	56,536	3,376	2,852
	P4(73yd3)	25,867	2,998	4,931
	P5(73yd3)	20,512	2,998	4,931
	P6(73yd3)	17,757	2,998	4,931

Tabla 22: Plan promedio diario, diciembre 2018

	Equipo	Ton	Hor Pond	Pend Pond
Ch Óxidos	CF2(36yd3)	1,882	4,216	1,252
	P1(50yd3)	8,493	4,216	1,402
	P2(50yd3)	23,620	5,967	2,432
	P1(73yd3)	3,981	1,653	3,501
	P3(73yd3)	21,200	1,643	1,473
	P4(73yd3)	26,298	4,216	1,358
	P5(73yd3)	38,471	4,216	1,402
	P6(73yd3)	40,441	4,216	1,402
Ch Sulf RT	P2(50yd3)	4,977	3,350	7,510
	CF3(50yd3)	20,920	5,793	5,697
	CF4(50yd3)	16,262	5,690	5,736
	P1(73yd3)	41,097	1,534	4,380
	P2(73yd3)	64,008	5,597	5,772
	P7(73yd3)	53,080	5,793	5,697
Ch Sulf Chuqui	P2(50yd3)	1,457	7,983	3,244
	CF3(50yd3)	6,051	3,569	5,616
	CF4(50yd3)	4,708	3,466	5,655
	P1(73yd3)	11,864	3,871	4,109
	P2(73yd3)	18,466	3,373	5,690
	P7(73yd3)	15,317	3,569	5,616
OBL	CF2(36yd3)	4,471	5,577	2,063
	P1(50yd3)	6,974	5,577	2,213
	P2(50yd3)	5,831	7,510	3,068
	P3(73yd3)	7,778	3,860	2,194
	P4(73yd3)	21,970	5,577	2,114
	P5(73yd3)	11,272	5,577	2,213
	P6(73yd3)	21,426	5,577	2,213
Lastre	CF2(36yd3)	16,686	2,998	5,081
	P1(50yd3)	9,414	2,998	5,231
	P2(50yd3)	8,546	4,346	3,432
	CF1(36yd3)	20,890	3,376	3,002
	P3(73yd3)	54,465	3,376	3,002
	P4(73yd3)	10,203	2,998	5,172
	P5(73yd3)	16,508	2,998	5,231
	P6(73yd3)	19,926	2,998	5,231

4.3.4. Modelamiento

El modelamiento del caso de estudio se realiza de igual manera que para el caso del modelo de calibración, con la salvedad que para el año 2018 las palas tienen más de un destino. La solución propuesta fue considerar un tiempo de ciclo y un tiempo de cola en servidor (si aplica) medio ponderado por el tonelaje, tal como se hace actualmente en la estimación del tiempo de ciclo medio anual. Es decir reducir de “n” circuitos a uno equivalente.

Los datos para estimar los tiempos de ciclo y horas operacionales fueron los mismos que para el modelo de calibración, sin embargo se promediaron los tiempos de los cuatro días del 2012 para ser aplicados al 2018.

Debido a que para el nuevo chancador aún no se tienen datos, pues está planificado que la nueva planta entre en ramp up el 2016, se consideró el tiempo de servicio del chancador de sulfuros de Chuquicamata. Esta decisión se basó en que el tipo de roca es el mismo que se procesará en la nueva planta, además el mineral oxidado es más blando y el chancador de óxidos trabaja a un setting mayor.

4.3.5. Resultados

Los resultados que arroja el modelo son el de tiempo de espera en cola de los camiones en cada servidor. En este caso se tiene cuatro días que reflejan el promedio de cuatro meses: Febrero, Junio, Octubre y Diciembre del año 2018.

Al igual que en el modelo de calibración, el tiempo en cola tiene directa injerencia en la producción total del circuito y en el número de camiones necesarios para poder satisfacer el plan.

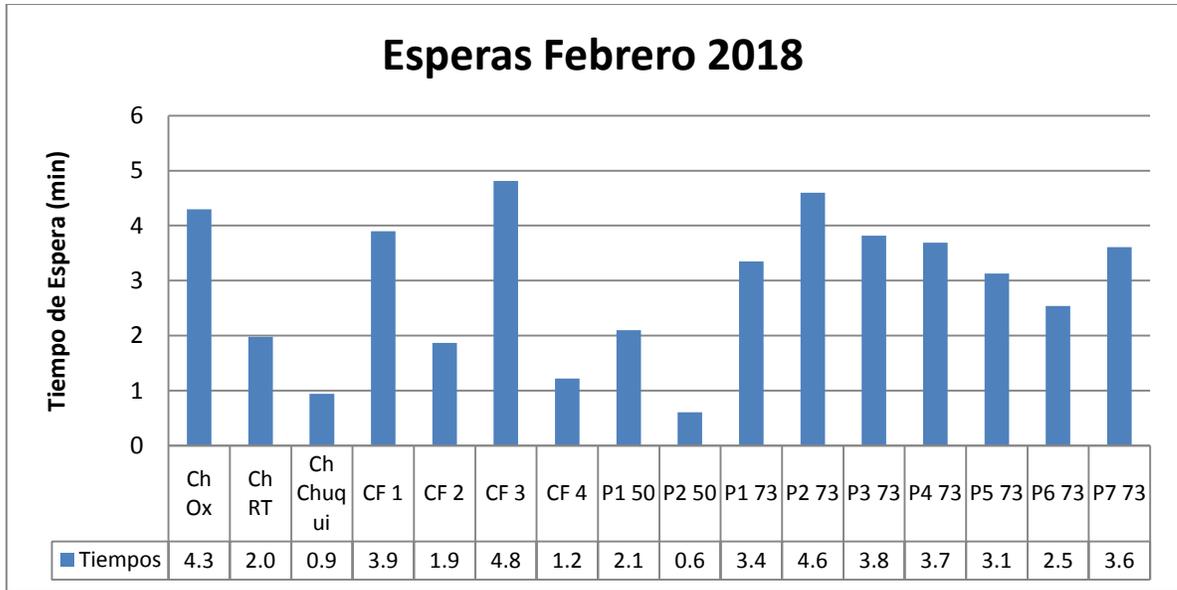


Ilustración 39: Tiempo en cola por servidor - febrero 2018

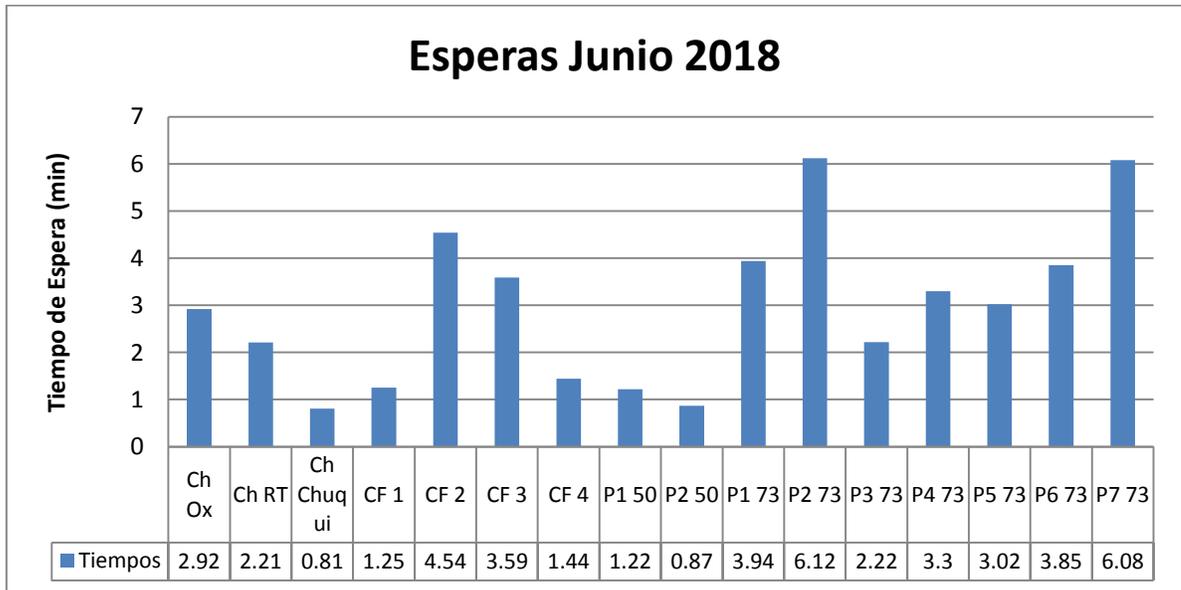


Ilustración 40: Tiempo en cola por servidor - junio 2018

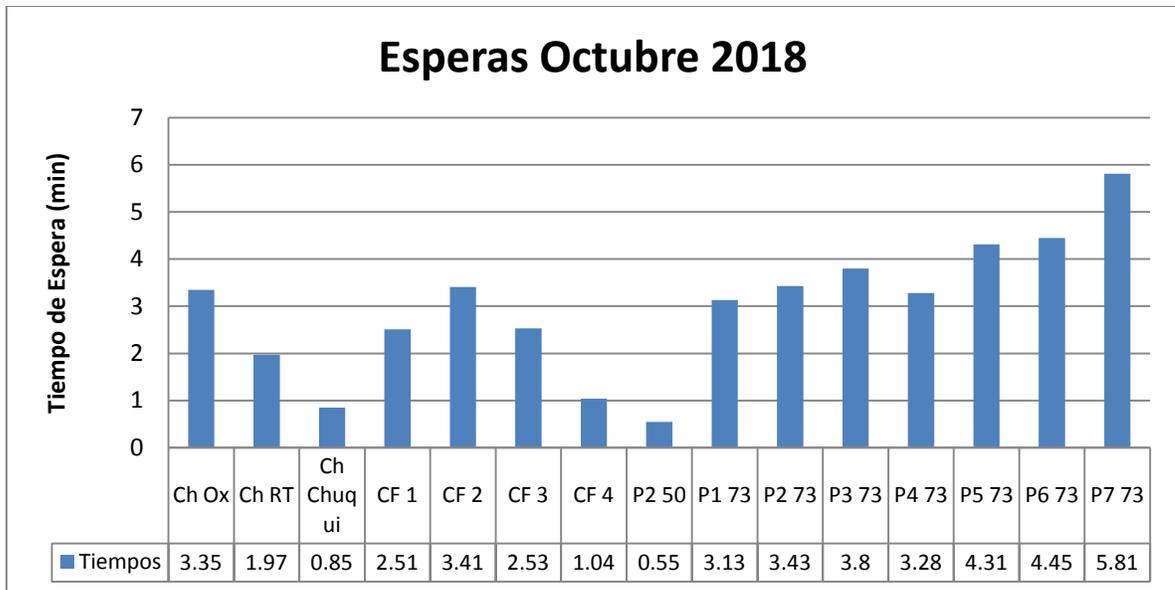


Ilustración 41: Tiempo en cola por servidor - octubre 2018

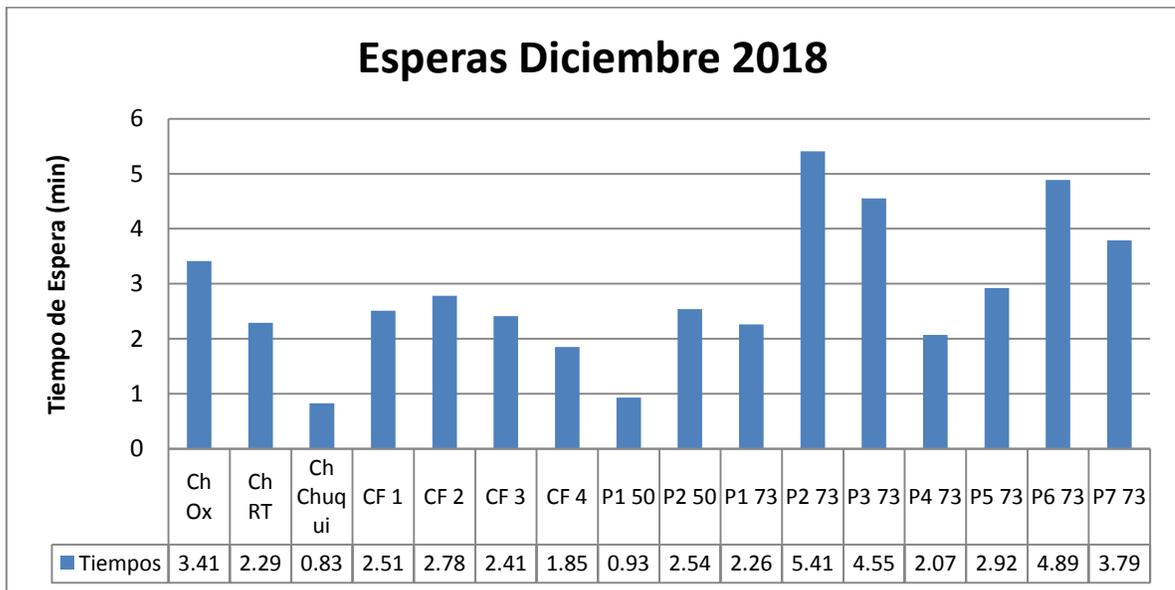


Ilustración 42: Tiempo en cola por servidor - diciembre 2018

La producción total de la mina se ve afectada por este tiempo en cola, disminuyendo debido al aumento del tiempo de ciclo. La Ilustración 43, Ilustración 44, Ilustración 45 e Ilustración 46 muestran para cada mes las diferencias entre alimentación a chancadores y desarrollo planificado versus los movimientos totales modelados.

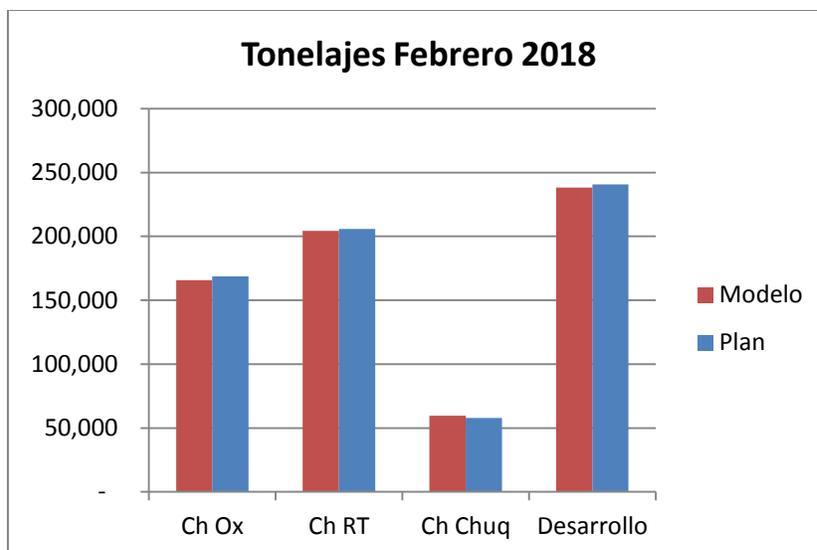


Ilustración 43: Producción planificada y modelada - febrero 2018

Tabla 23: Producción planificada y modelada - febrero 2018

Destino	Modelo	Planificación	Diferencia
Ch Ox	165,726	168,631	1.7%
Ch RT	204,412	205,891	0.7%
Ch Chuq	59,646	57,936	-3.0%
Desarrollo	238,144	240,820	1.1%
Total	667,928	673,277	0.8%

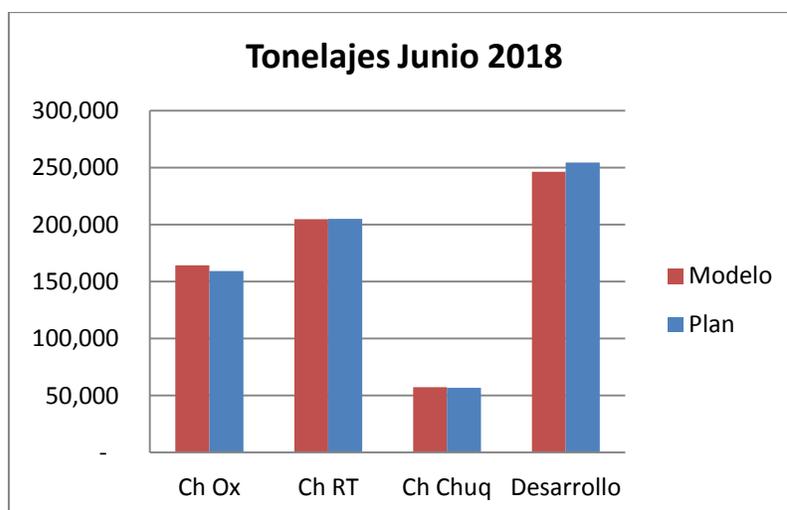


Ilustración 44: Producción planificada y modelada - junio 2018

Tabla 24: Producción planificada y modelada - junio 2018

Destino	Modelo	Planificación	Diferencia
Ch Ox	164,157	159,238	-3.1%
Ch RT	204,693	204,993	0.1%
Ch Chuq	57,460	56,856	-1.1%
Desarrollo	246,497	254,400	3.1%
Total	672,808	675,487	0.4%

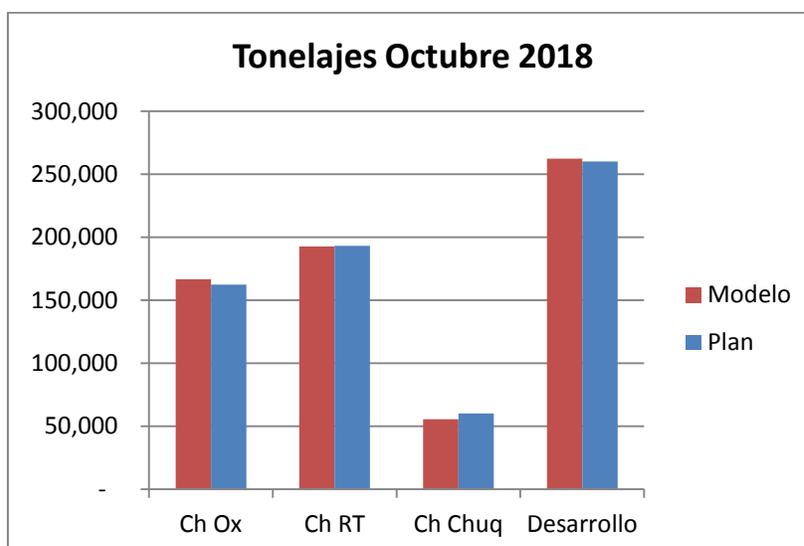


Ilustración 45: Producción planificada y modelada - octubre 2018

Tabla 25: Producción planificada y modelada - octubre 2018

Destino	Modelo	Planificación	Diferencia
Ch Ox	166,570	162,386	-2.6%
Ch RT	192,561	193,241	0.4%
Ch Chuq	55,518	60,080	7.6%
Desarrollo	262,454	260,084	-0.9%
Total	677,103	675,791	-0.2%

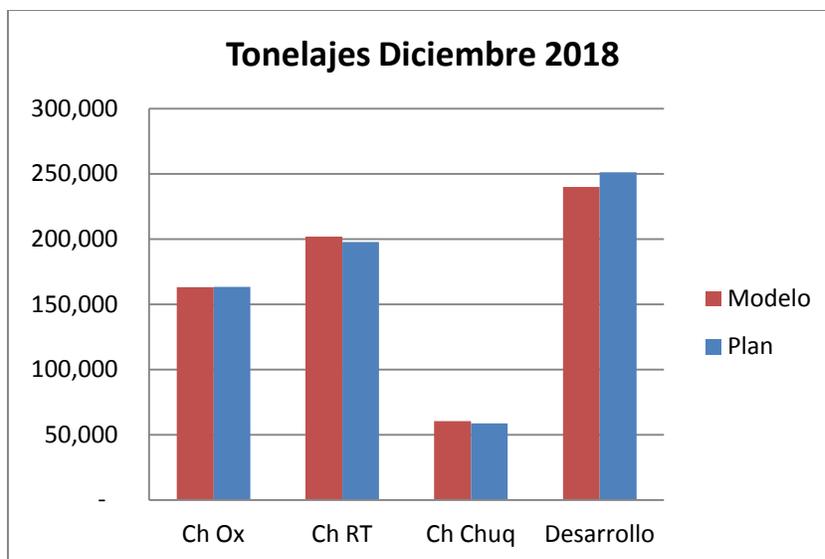


Ilustración 46: Producción planificada y modelada - diciembre 2018

Tabla 26: Producción planificada y modelada - diciembre 2018

Destino	Modelo	Planificación	Diferencia
Ch Ox	163,226	163,282	0.03%
Ch RT	201,910	197,683	-2.1%
Ch Chuq	60,430	58,757	-2.8%
Desarrollo	240,037	251,088	4.4%
Total	665,603	670,810	0.8%

La producción lograda por el modelo se obtiene utilizando los camiones reestimados por el modelo, es decir, 9 más en promedio.

Con los tiempos en cola obtenidos por el modelo se reestima el tiempo de ciclo medio para cada mes y con ello la flota de camiones requerida para el cumplimiento del plan diario. Los siguientes gráficos muestran el tiempo de ciclo medio modelado y planificado para cada mes y la flota efectiva de camiones.

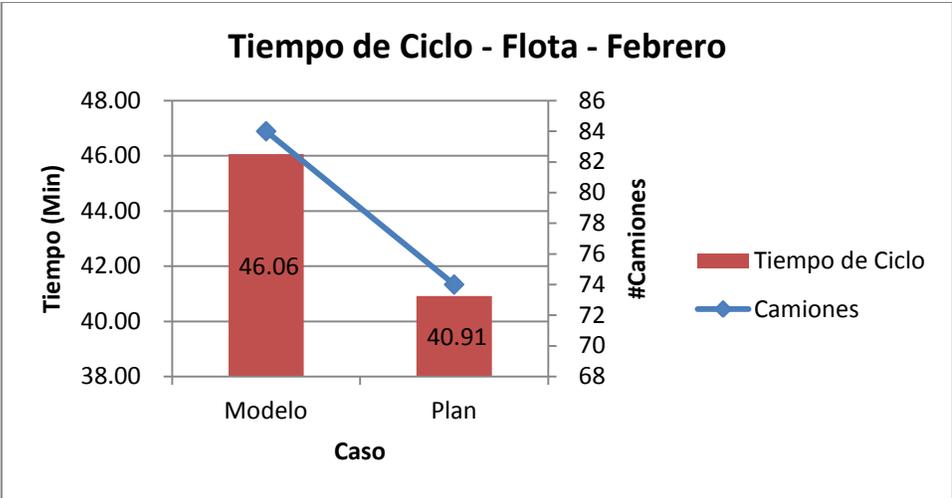


Ilustración 47: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - febrero 2018

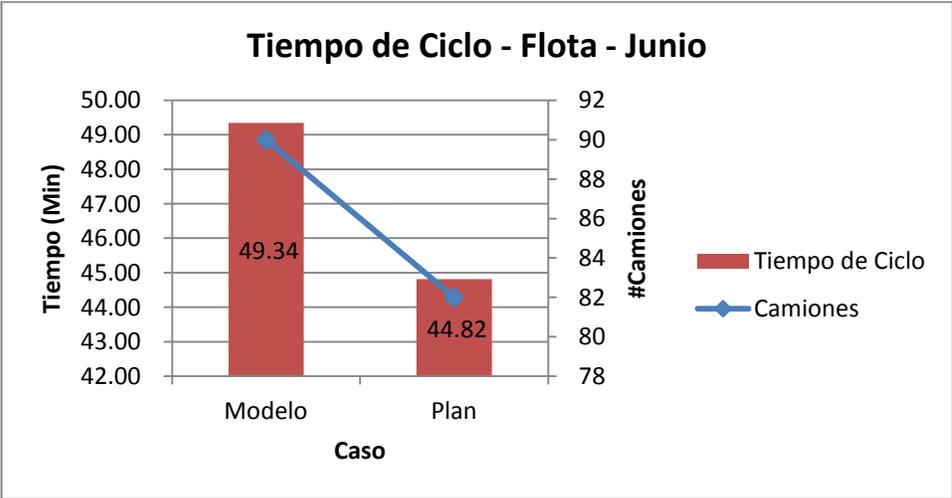


Ilustración 48: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - junio 2018

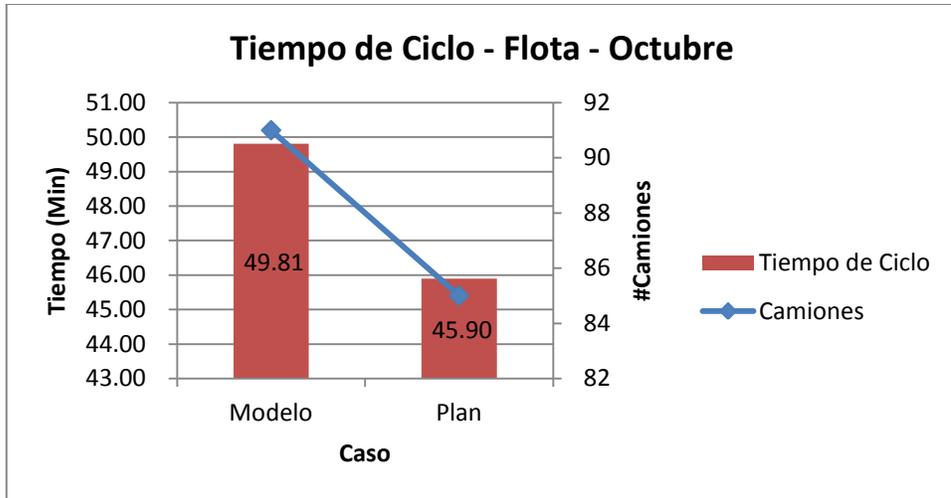


Ilustración 49: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - octubre 2018

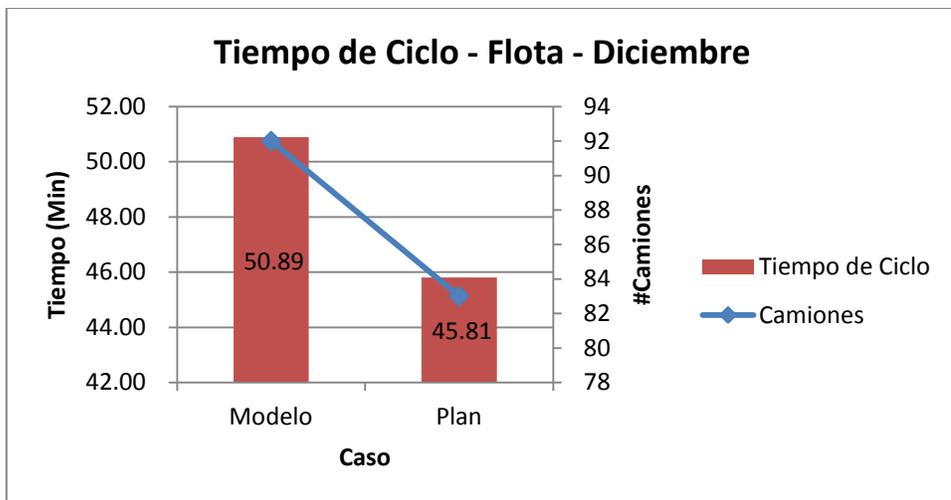


Ilustración 50: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - diciembre 2018

4.4. Análisis de resultados - 2018

Antes de aplicar el modelo de teoría de colas se calculan los camiones de forma determinista, obteniendo 108 camiones Komatsu. La flota estimada por la planificación del proyecto de sulfuros RT, para el 2018 era de 105 camiones, sin embargo se estaban considerando camiones Liebherr de mayor capacidad que los Komatsu. Al realizar la equivalencia se tiene:

Modelo	Unidad	Capacidad	Cantidad
Komatsu 930 – E	Ton	300	78
Liebherr T282 B	Ton	327	27

$$KOM Eq = \frac{Cap Kom * \# Kom + Cap Lieb * \# Lieb}{Cap Kom} = \frac{300 * 78 + 327 * 27}{300} = 107.43 \quad (32)$$

Redondeando se obtienen los mismos 108 camiones que entrega el modelo antes de añadir el tiempo de espera en cola.

Entre los resultados más importantes se encuentra el aumento del tiempo de ciclo ponderado de los cuatro casos y el aumento de la flota total. El desglose del tiempo de ciclo por pala para el año 2018 se adjunta en el anexo A5.

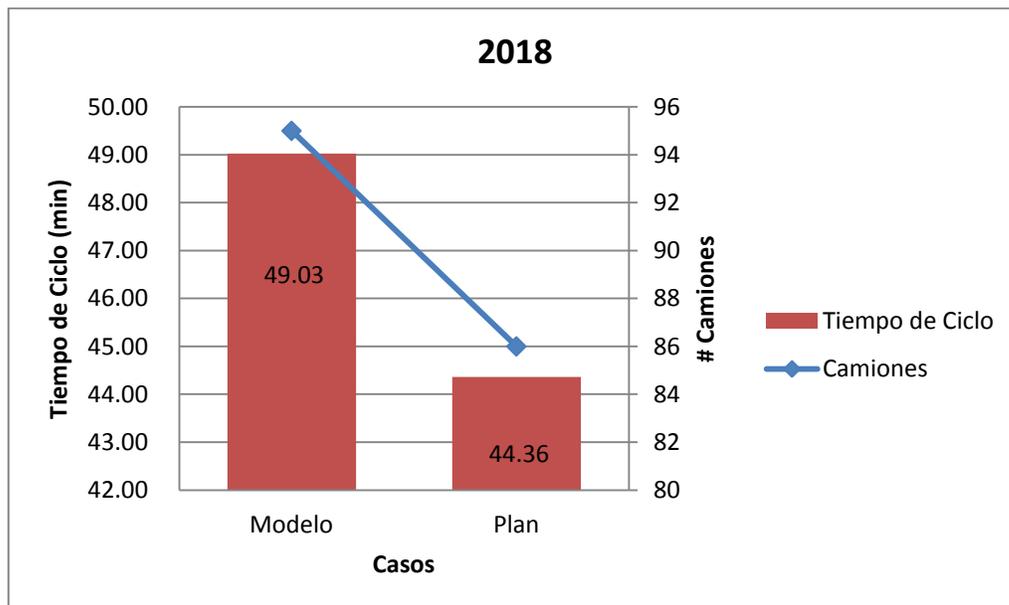


Ilustración 51: Flota y Tiempo de ciclo (modelo y plan) - promedio 2018

Se aprecia que el aumento del tiempo de ciclo es de un 9.5%, además se debe considerar que el tiempo de ciclo y el número de camiones son variables directamente proporcionales, tal como se aprecia en la ecuación.

$$\#Camiones = \frac{Ton\ a\ Mover}{\frac{60}{T.Ciclo} * Cap.Camion * Horas\ operacionales} \quad (33)$$

Por lo tanto es coherente que los camiones efectivos aumenten de 86 camiones a 95. En términos de flota la diferencia sería de 108 a 119, considerando un factor de disponibilidad de 80%.

Sin embargo, se debe considerar que el modelo tiene un error de 31% producido por la estimación del tiempo en cola, que significa una desviación del tiempo de ciclo medio de $\pm 1.8\%$.

5. Conclusiones y Recomendaciones

De este trabajo pueden desprenderse dos tipos de conclusiones: del modelamiento propiamente tal y desde la perspectiva de un estudio adicional a la planificación minera.

En la metodología utilizada por Radomiro Tomic para el cálculo de equipos de transporte en ningún caso se considera algún cálculo del tiempo en que el camión permanece en cola esperando a ser atendido por un servidor de carguío o chancado, solo un valor aproximado por ciclo (1 minuto), por lo que este modelo permite una mejor aproximación al tiempo de ciclo real al estimar el tiempo en cola. El modelo también utiliza las desviaciones estándar de cada tiempo, lo que genera variabilidad en el ciclo total, logrando una mejor interpretación de los datos reales. Debido a lo antes señalado, el modelo como idea de cuantificar el tiempo de espera y agregarlo al tiempo de ciclo es un avance respecto de lo que actualmente se hace.

El modelo de teoría de colas es de rápida construcción y representa una buena aproximación para una actividad que aún no se aplica masivamente a la planificación minera. Mientras que otro tipo de modelamiento, como la simulación de eventos discretos, tarda del orden de tres meses en su construcción y validación. La revisión de la literatura muestra que no existen grandes diferencias entre los modelos analíticos y de simulación para casos estacionarios y cuando se cumplen las hipótesis de estos últimos. En este caso se podría hablar de un caso estacionario, tanto para el modelamiento del día como para el modelar un mes o año. En el día se asigna una pala fija a una frente con un destino fijo por día, es decir, en la unidad discreta de día, la mina no presenta mayores variaciones. En el caso mensual, si bien la mina presenta dinamismo con el paso de los días y semanas, para la planificación de largo plazo se busca un número, que es el tiempo de ciclo medio. Por ende, todo el movimiento se ve representado por un número medio que es capaz de representar todo el dinamismo de la mina. Bajo estas condiciones, el modelo se puede aplicar bien a una unidad discreta de tiempo, asumiendo el error que significa el promediar todos los días en una cifra.

El resultado de este trabajo indica que el modelo de Elbrond, para la estimación del tiempo de espera en cola, tiene un 25% de diferencia con el tiempo de espera real utilizando los datos reales de la mina. Aumenta hasta un 30% al agregar otras variables de planificación, tales como horas efectivas de operación de equipos, modelo de velocidad, camiones Komatsu equivalentes y plan de producción. Si bien el error es de un 30% se debe recalcar que lo que actualmente se utiliza por planificación es un valor aún más por debajo de lo que realmente sucede, es aquí donde el modelo genera un aporte. Para el 2018 el modelo estima aproximadamente 4 minutos de espera, a pesar que el modelo de calibración dista de la realidad, se debe tener atención en esta situación. Esto se da principalmente porque para iguales movimientos mina se tiene un lugar de descarga que genera

cola y porque se tiene planificada la utilización de 3 equipos menos de carguío, lo que satura más cada servidor para un mayor número de clientes.

Entre las recomendaciones, las posibles mejoras al modelo, están enfocadas principalmente en la estimación al tiempo en cola, que es donde se presenta el mayor error. Las mejoras pueden separarse en dos aristas: modelamiento y datos de entrada.

Entre las mejoras al modelo, podría replantearse la ecuación de ponderación entre los tiempos de cola $M/M/1$, $M/D/1$ y $D/D/1$, dado que tal expresión es netamente un aporte del autor. Además, la fenomenología de los eventos no está representada en las ecuaciones, pues se aprecia en los histogramas de carga y descarga que éstos no distribuyen de forma exponencial, por lo que el poder considerar la solución $M/G/1$ para estos casos podría mejorar la precisión de la estimación.

En cuanto a los datos de entrada, uno de los más importantes es disponibilidad de los equipos de carguío. Este valor es la resultante entre las fallas y las mantenciones programadas de cada equipo en particular, por lo que considerar un valor medio dejaría de considerar la fenomenología detrás de los tiempos entre fallas y los tiempos de reparación. Para implementar esta mejora se requeriría de modelos que abarquen más tiempo de operación que un solo día, ya que la curva de fallas y mantenciones son a escala de días/horas y no de minutos.

6. Bibliografía

- [1] Codelco Chile, 2011, “Estudio de prefactibilidad, Explotación Sulfuros Radomiro Tomic Fase II”, Capítulo 8 “Minería y Reservas minerales”.
- [2] Codelco Chile., 2012, “Modelo Conceptual Simulación Radomiro Tomic “, Uso interno
- [3] Plaistowe, R., Algeo, M., 1979, “The determination of haulage-truck requirements for an open-pit operation”, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy pp.185 - 190
- [4] García J., 2010, “Teoría de Colas”, Departamento de Organización de Empresas, Universidad Politécnica de Valencia.
- [5] González F., 2004, “Variables Aleatorias, Proyecto MateX”, Bachillerato Matemáticas, Universidad de Cantabria.
- [6] Panico J., 1969, “Teoría de las Colas”.
- [7] Kleinrock L. , 1975, “Queueing Systems, Vol 1: Theory”, Capítulos 1, 2, 3.
- [8] Curry, G., Feldman, R., 2010, “Manufacturing Systems Modeling and Analysis”, Capítulo 3.
- [9] Elbrond J., 1977, “Calculation of an Open Pit Operation’s Capacity”, SME Fall Meeting and Exhibit, St. Louis, Missouri.
- [10] Elbrond J., 1990, “Haulage System Analysis: Queuing Theory”, Surface Mining, 2nd Edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, pp.743-748.
- [11] García, E., García, H., Cárdenas L., 2006, “Simulación y análisis de sistemas con Promodel”, Primera Edición.
- [12] Banks J., 1998, “Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice”, Capítulo 1, Georgia Institute of Technology.
- [13] Hall B, 2000, “Simulation Modelling of Mining Systems”, MassMin 2000, pp. 93-85.
- [14] Hoare, R., 2007, “The role of simulation modelling in project evaluation”, 2007 Project evaluation conference, Melbourne VIC.
- [15] Yarmuch, J., 2012, “Simulación del sistema de carguío y transporte Mina Chuquicamata”, Tesis para optar al grado de magíster en Minería.
- [16] Marambio, G., 2010, “Efecto del diseño minero en la velocidad de los equipos de transporte”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas.

[17] Flores O., “Simulación y asignación de camiones, Mina Los Bronces”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas.

[18] Elbrond J., Piché A., Caines R., 1977, “A new procedure for the calculation of an open pit operation’s capacity at the Carol Lake operations of the Iron Ore Company of Canada”, 16th Apcom Symposium.

[19] Nauroze S., 2009, “Lecture 4: Kendall’s notation, M/M/1 queuing system, Little’s result, Queuing theory and teletraffic systems, University of Engineering and Technology, Taxila.

[20] Ramani R., 1990, “Haulage Systemns Simulation Analysis”, Surface Mining 2nd edition

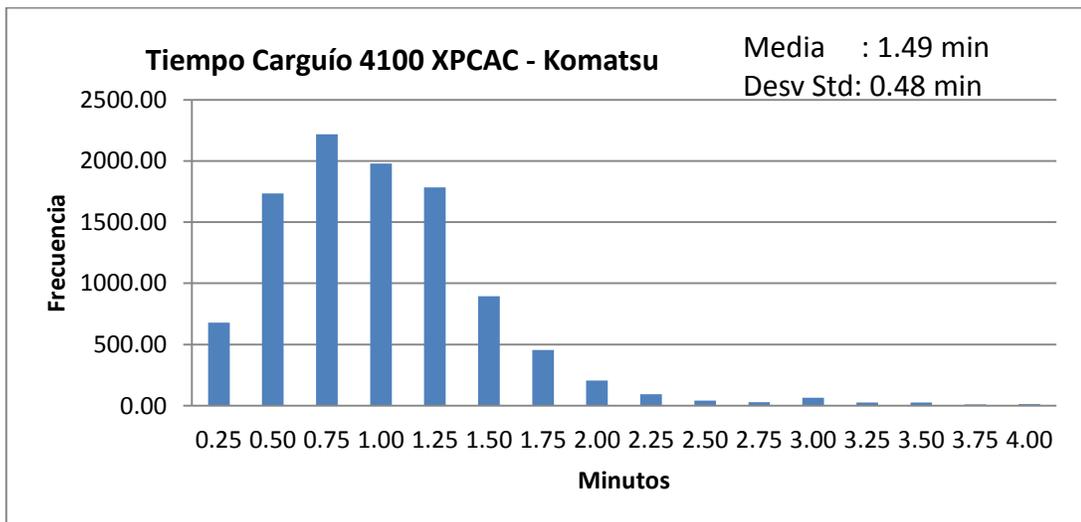
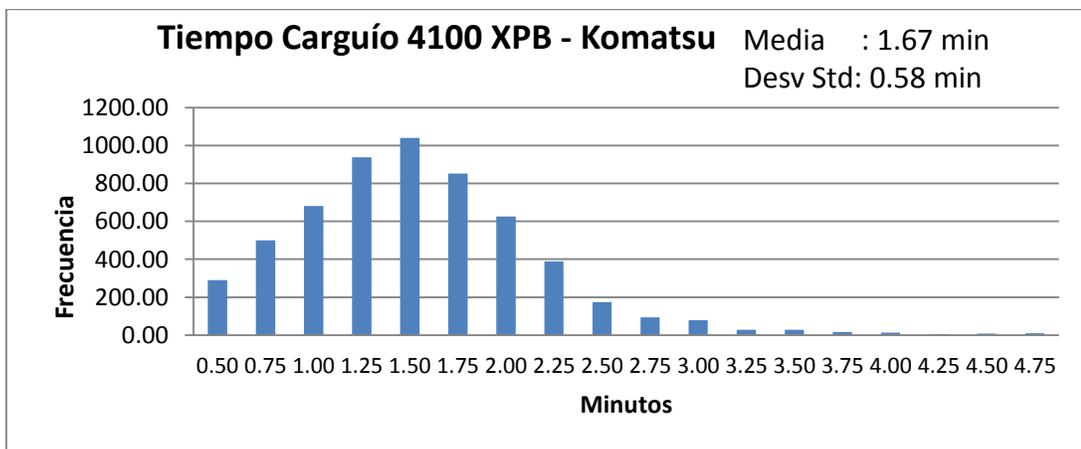
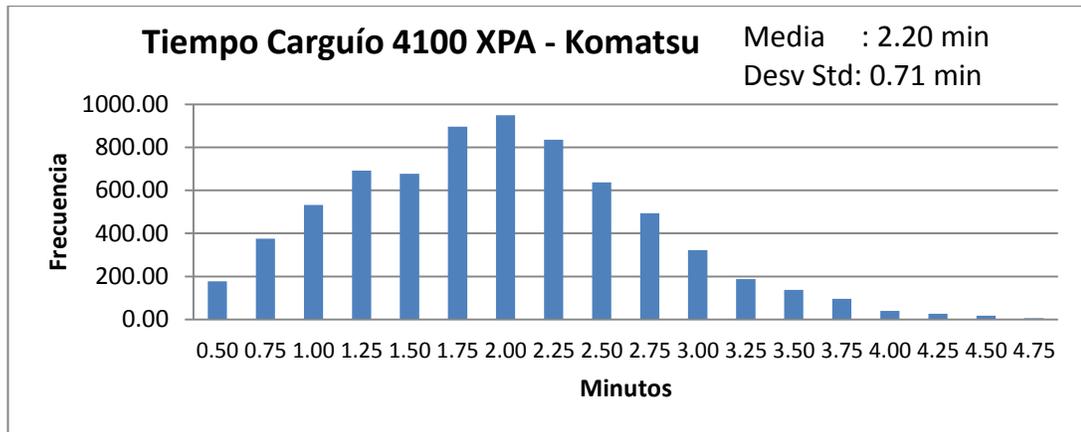
[21] Bohnet E., 1992, “Section 16 Surface Mining: Comparison of Methods ”, SME Mining Engineering Handbook, 2nd edition.

Anexos

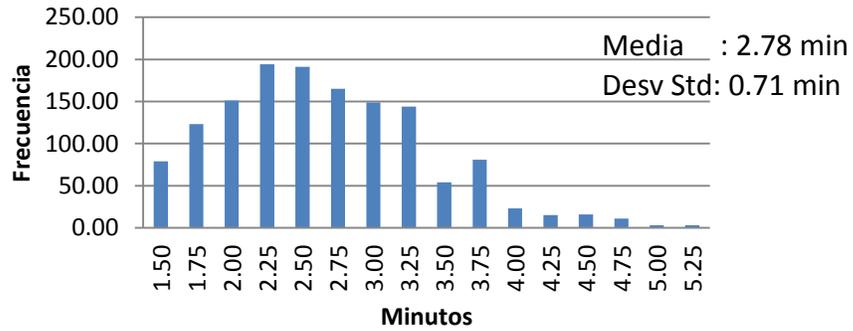
A.1 Plan Minero 2018

Periodo	REPORTE MOVIMIENTO MINA																						
	Sulfuros a Planta Concentradora								Total a Planta Concentradora				Mineral a Lixiviación								Lastre	Mov Total	
	A Planta CH				A Planta RT				Total Ambas Plantas				A Dump Leach (OBL)				A Heap Leach				A Botadero		
	Ton (kth)	CuT%	CuS%	MO ppm	Ton (kth)	CuT%	CuS%	MO ppm	Ton (th)	CuT%	CuS%	MO ppm	Ton (kth)	CuT%	CuS%	MO ppm	Ton (kth)	CuT%	CuS%	MO ppm	Ton (kth)		Ton (kth)
Ene_2018	1,819	0.61	0.0011	0.01	6,314	0.61	0.00	0.01	8,133	0.61	0.0011	0.01	1,292	0.17	0.11	-	4,960	0.41	0.24	0.001	6,376		20,761
Feb_2018	1,643	0.58	0.0009	0.01	5,702	0.58	0.00	0.01	7,346	0.58	0.0009	0.01	822	0.18	0.11	-	4,590	0.40	0.25	0.001	5,997	18,754	
Mar_2018	1,819	0.61	0.0005	0.01	6,312	0.61	0.00	0.01	8,131	0.61	0.0005	0.01	1,638	0.18	0.11	-	4,753	0.40	0.19	0.002	6,240	20,763	
Abr_2018	1,760	0.60	0.0006	0.01	6,108	0.60	0.00	0.01	7,868	0.60	0.0006	0.01	1,634	0.18	0.10	-	4,775	0.36	0.19	0.002	5,814	20,091	
May_2018	1,819	0.65	0.0005	0.01	6,313	0.65	0.00	0.01	8,132	0.65	0.0005	0.01	1,524	0.19	0.12	-	4,912	0.41	0.28	0.001	6,194	20,761	
Jun_2018	1,760	0.63	0.0003	0.01	6,109	0.63	0.00	0.01	7,869	0.63	0.0003	0.01	2,430	0.21	0.13	-	4,888	0.46	0.22	0.005	4,906	20,093	
Jul_2018	1,820	0.53	0.0006	0.01	6,315	0.53	0.00	0.01	8,135	0.53	0.0006	0.01	2,284	0.19	0.11	-	4,783	0.38	0.24	0.001	5,560	20,761	
Ago_2018	1,819	0.58	0.0010	0.01	6,313	0.58	0.00	0.01	8,132	0.58	0.0010	0.01	2,310	0.19	0.11	-	4,922	0.43	0.23	0.002	5,397	20,761	
Sep_2018	1,760	0.62	0.0007	0.01	6,109	0.62	0.00	0.01	7,869	0.62	0.0007	0.01	1,694	0.18	0.09	-	4,760	0.42	0.23	0.002	5,769	20,092	
Oct_2018	1,819	0.65	0.0005	0.02	6,312	0.65	0.00	0.02	8,131	0.65	0.0005	0.02	2,224	0.20	0.11	-	5,011	0.39	0.26	0.001	5,396	20,762	
Nov_2018	1,760	0.56	0.0006	0.02	6,107	0.56	0.00	0.02	7,867	0.56	0.0006	0.02	1,573	0.16	0.08	-	4,631	0.29	0.16	0.000	6,020	20,091	
Dic_2018	1,790	0.58	0.0004	0.02	6,211	0.58	0.00	0.02	8,001	0.58	0.0004	0.02	2,465	0.19	0.09	-	5,103	0.37	0.23	0.000	4,860	20,428	

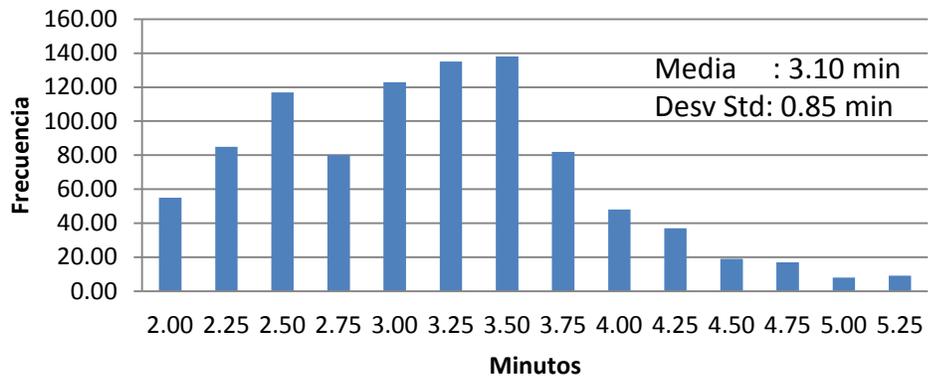
A.2 Histogramas – base de datos Jigsaw – Mes Septiembre de 2012



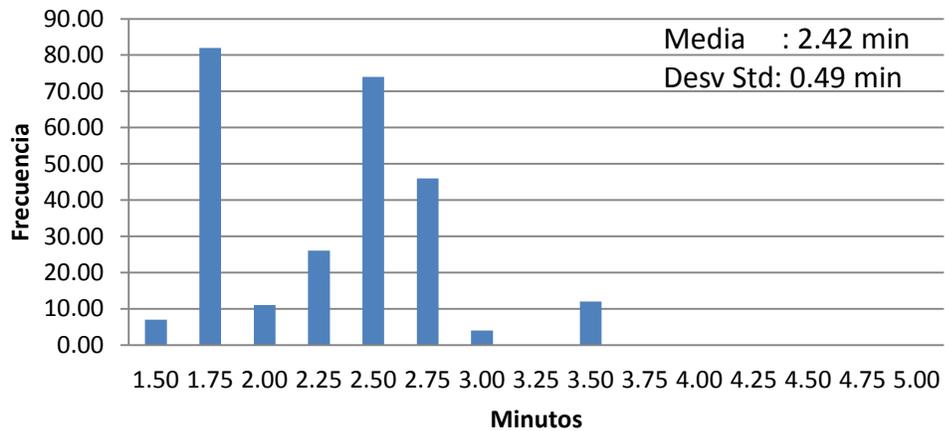
Tiempo Carguío PC 8000 - Komatsu

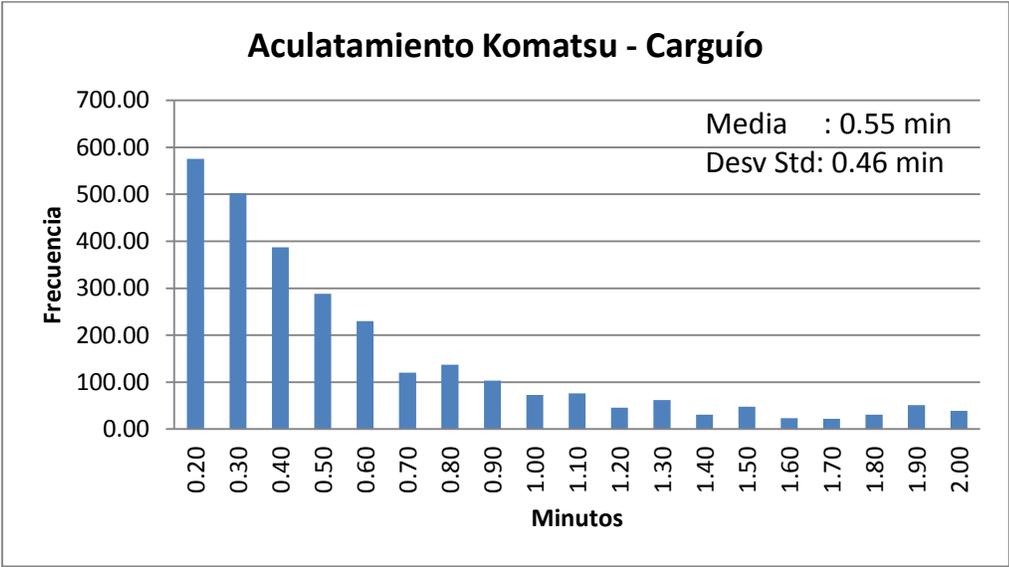
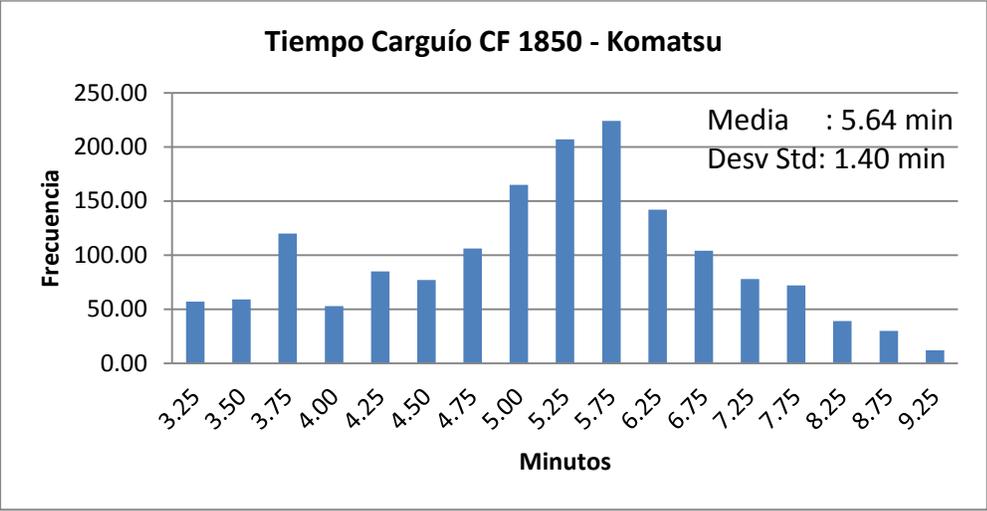
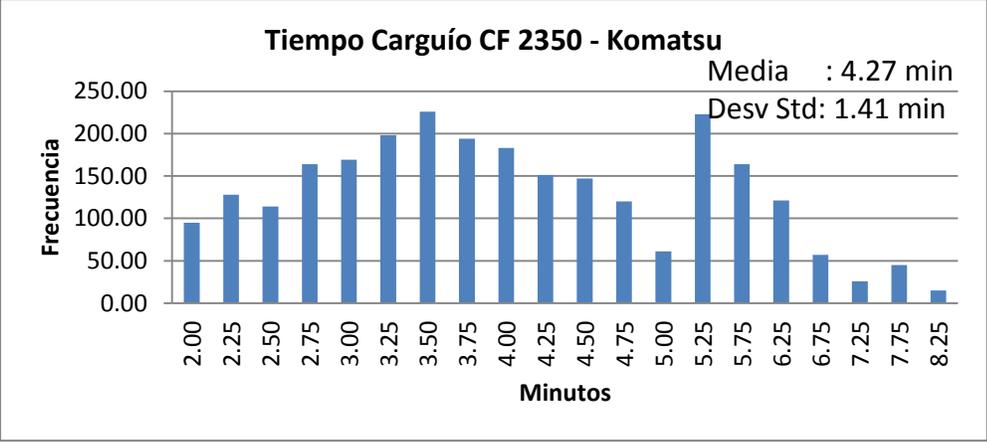


Tiempo Carguío RH 200- Komatsu

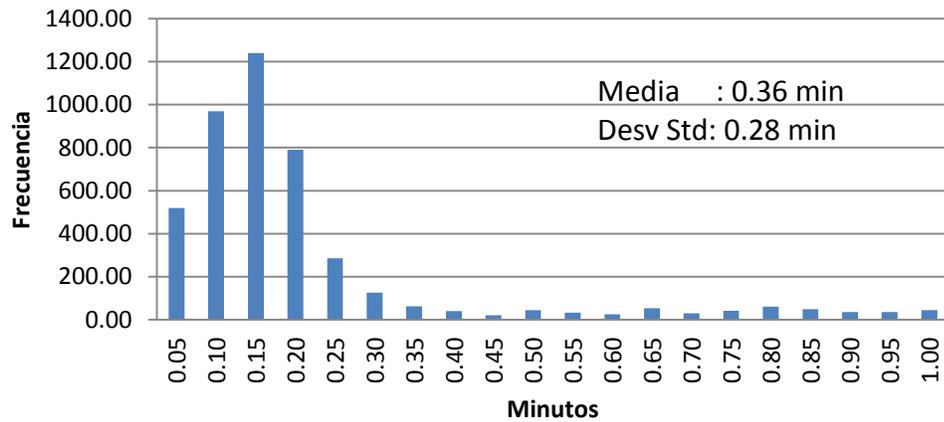


Tiempo Carguío RH 340- Komatsu

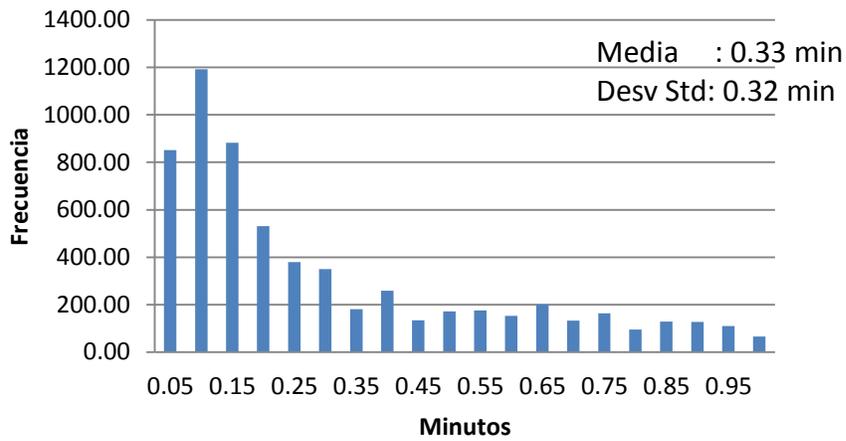




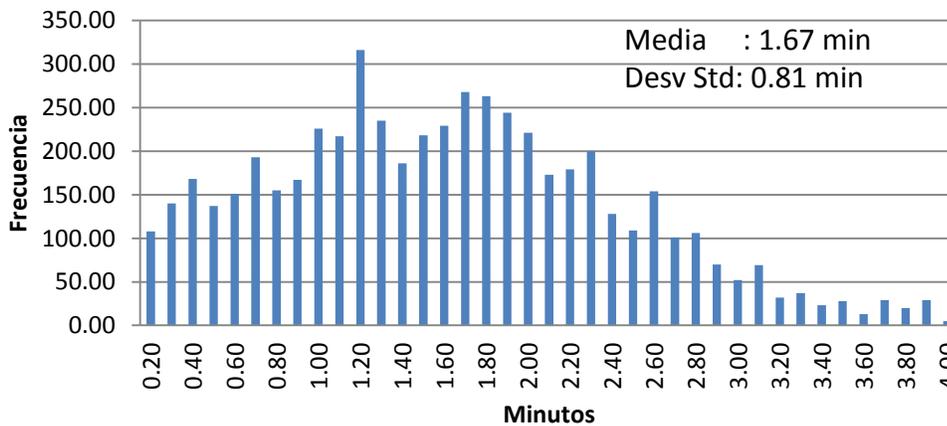
Aculatamiento Komatsu - Ch. Óxidos

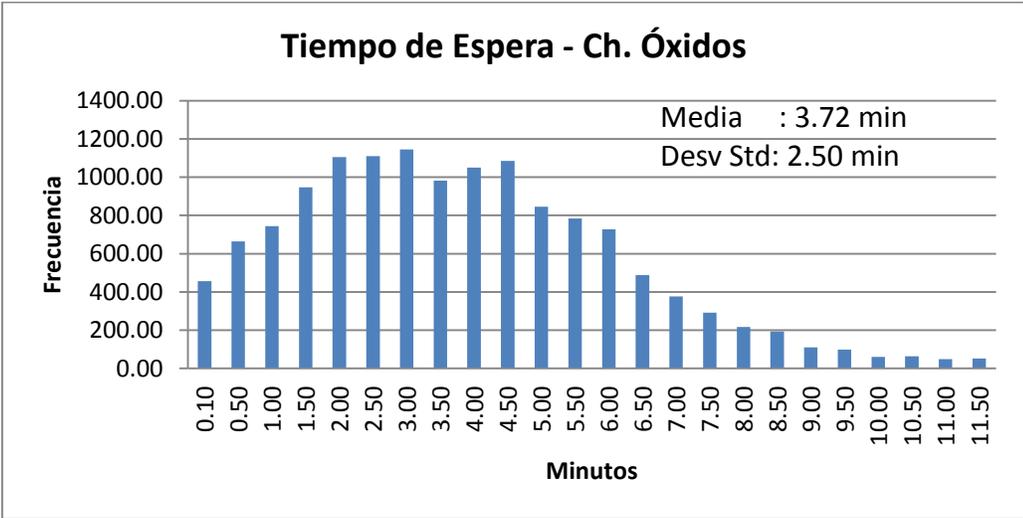
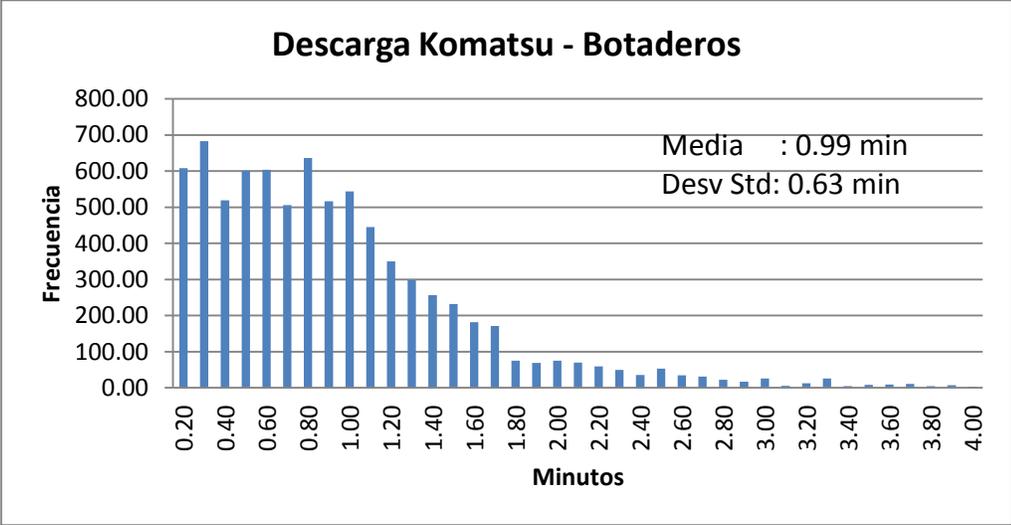
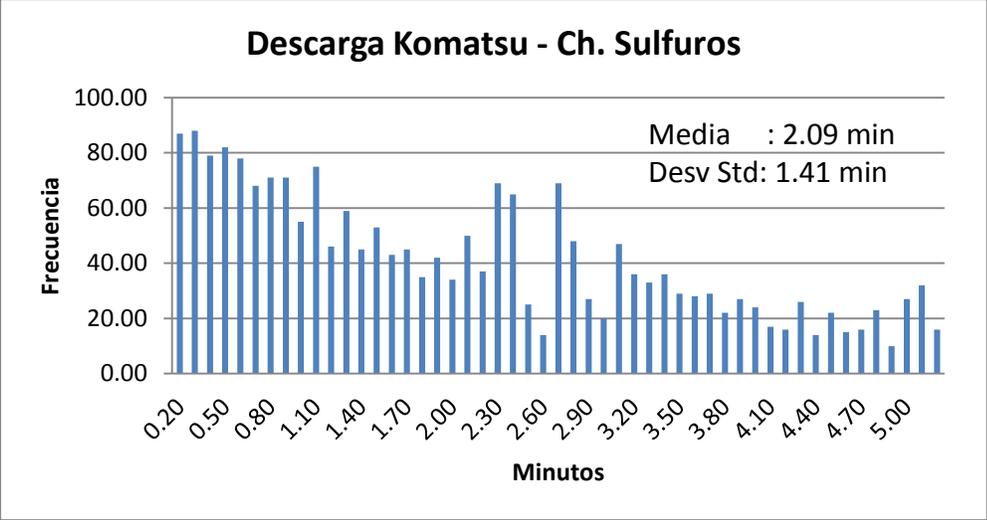


Aculatamiento Komatsu - Botaderos

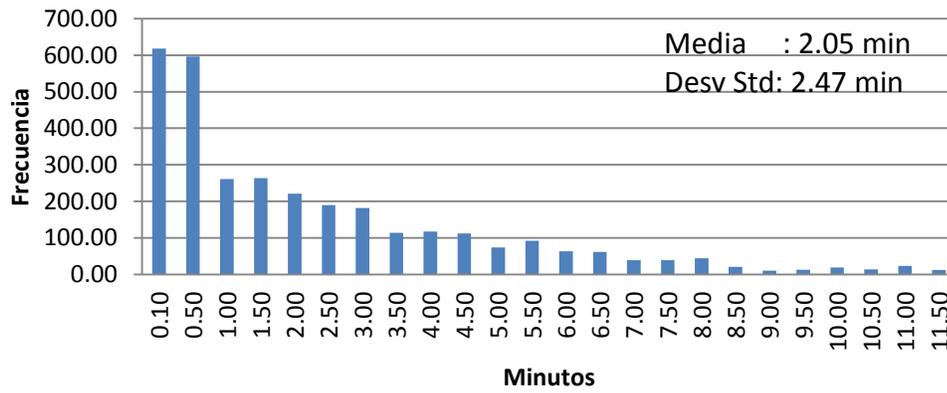


Descarga Komatsu - Ch. Óxidos

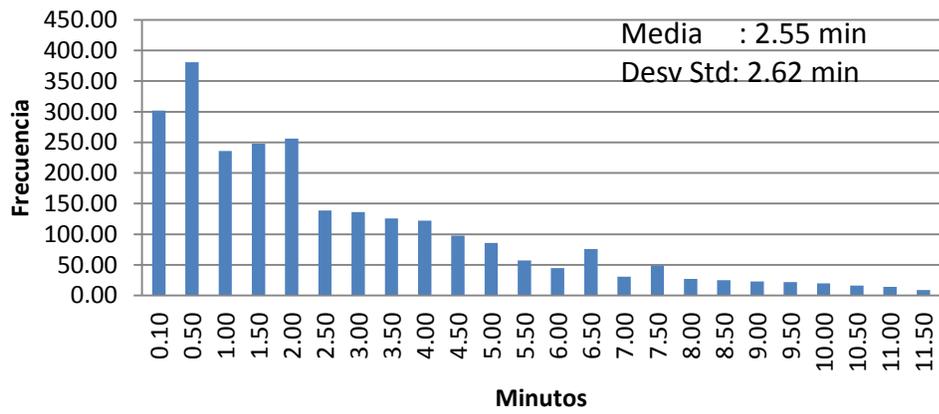




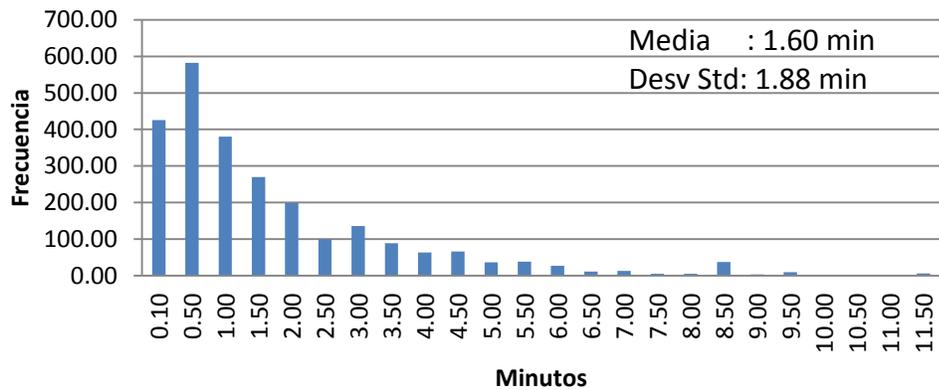
Tiempo de Espera - Ch. Sulfuros

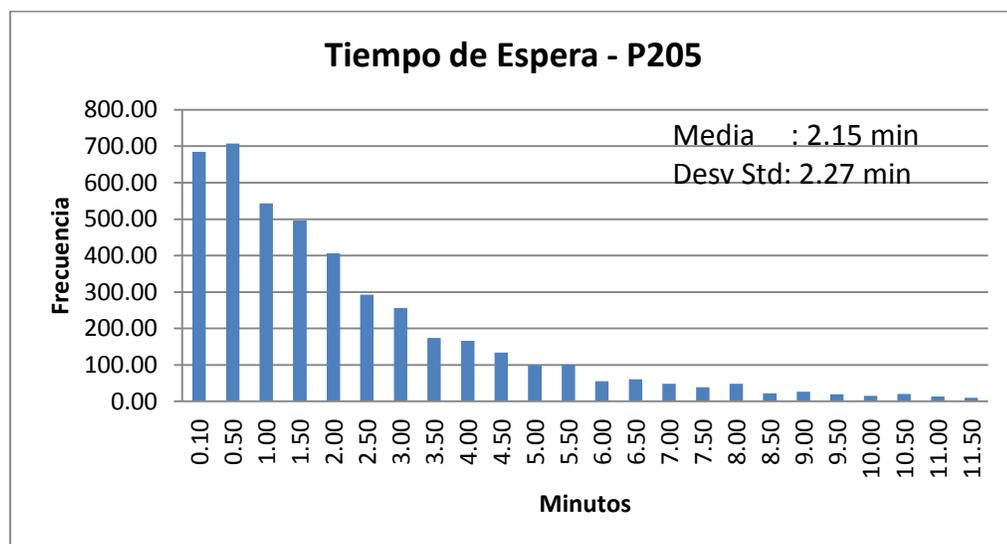
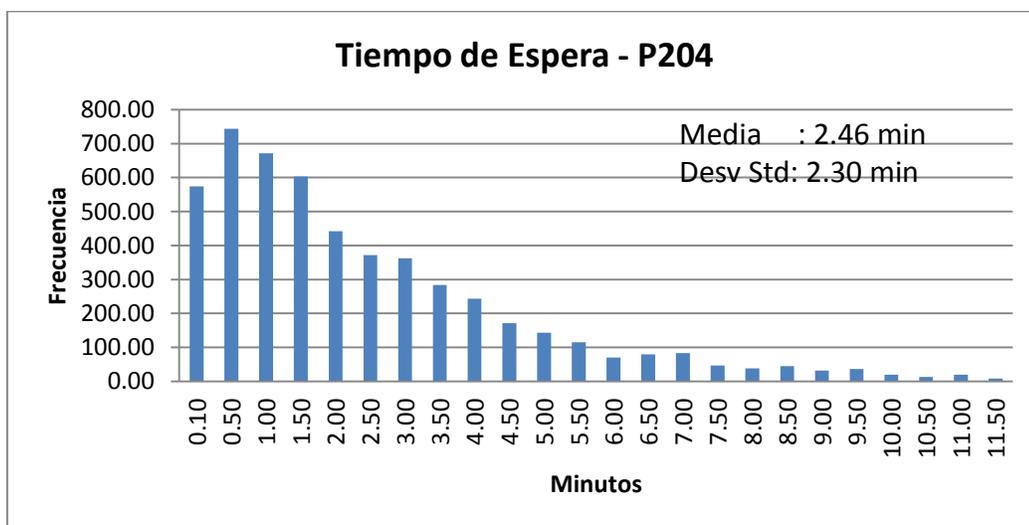
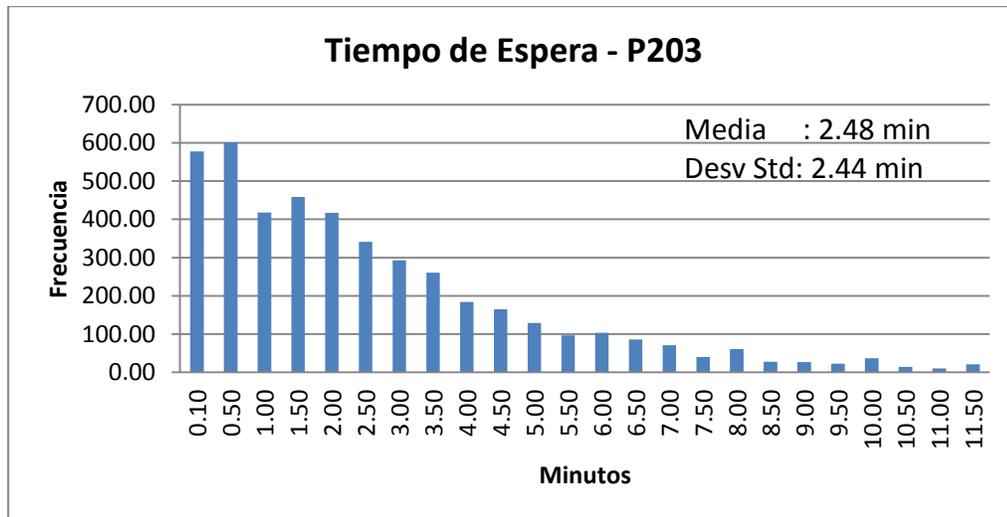


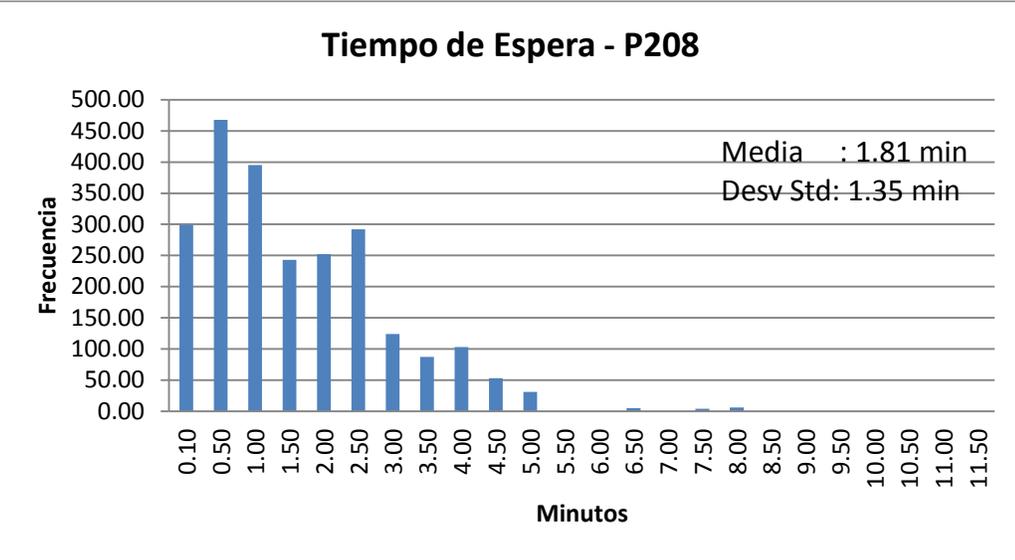
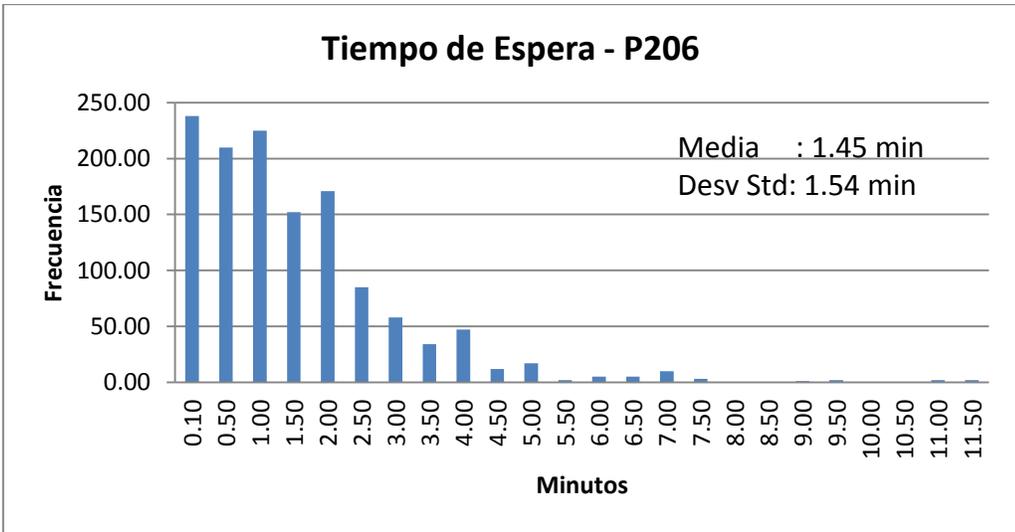
Tiempo de Espera - P201

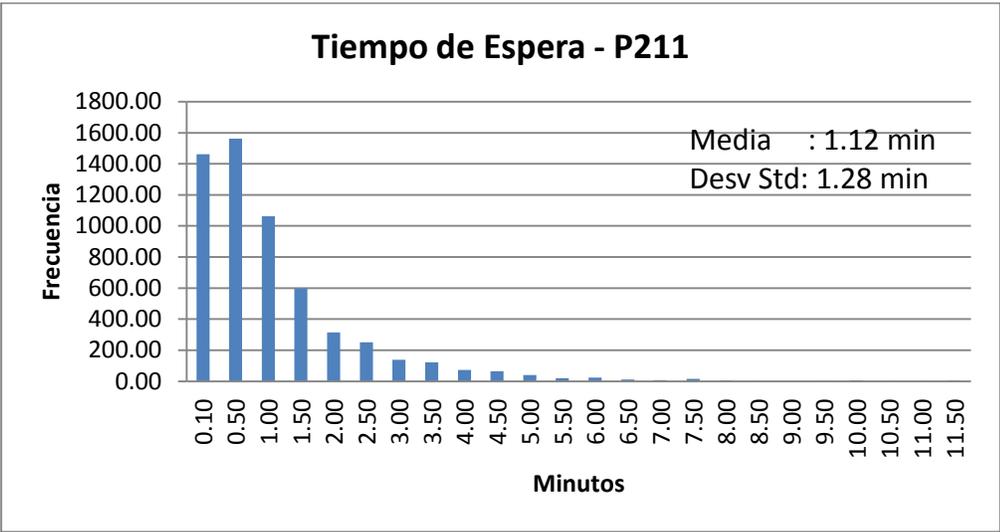
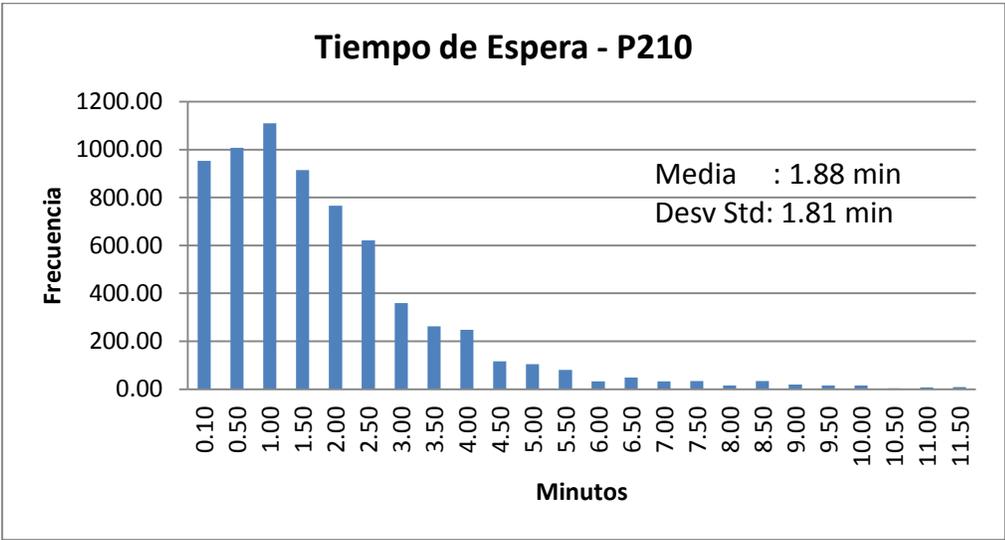
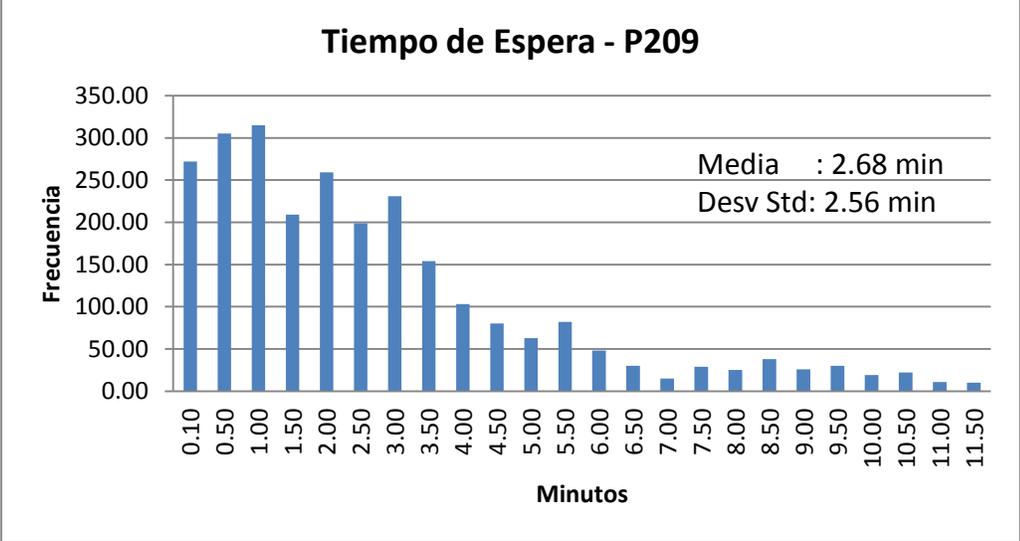


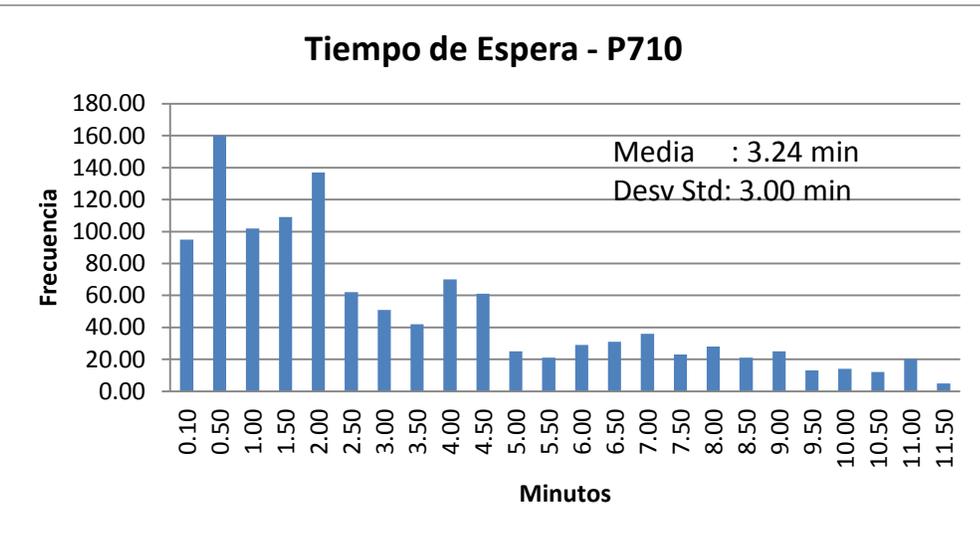
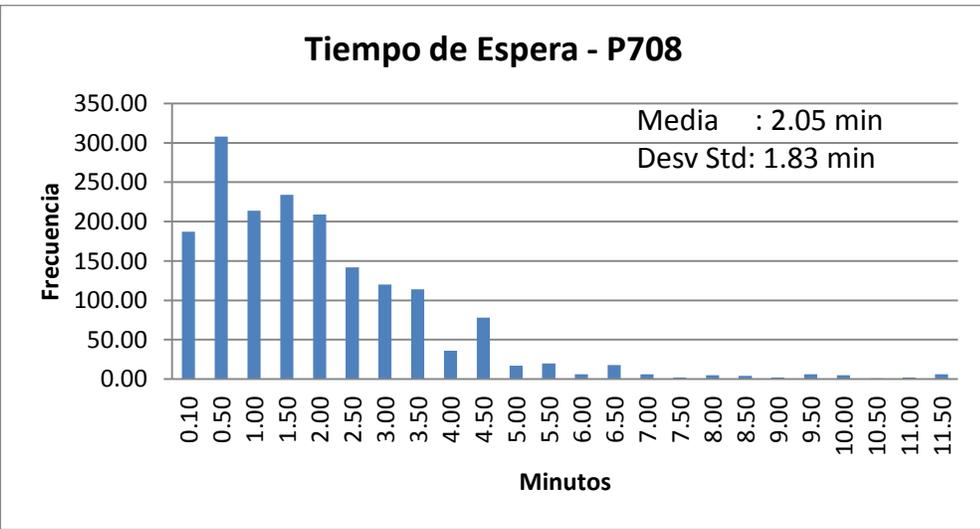
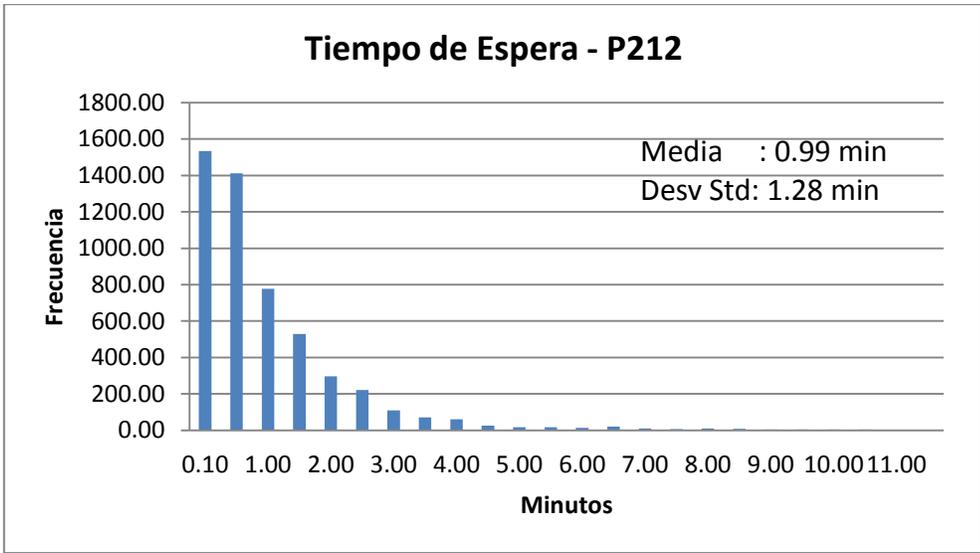
Tiempo de Espera - P202

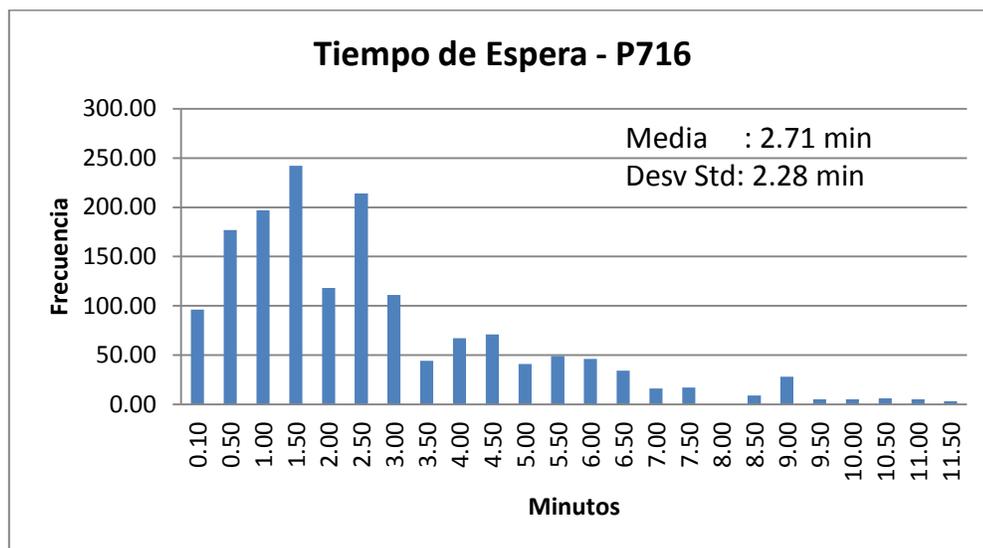
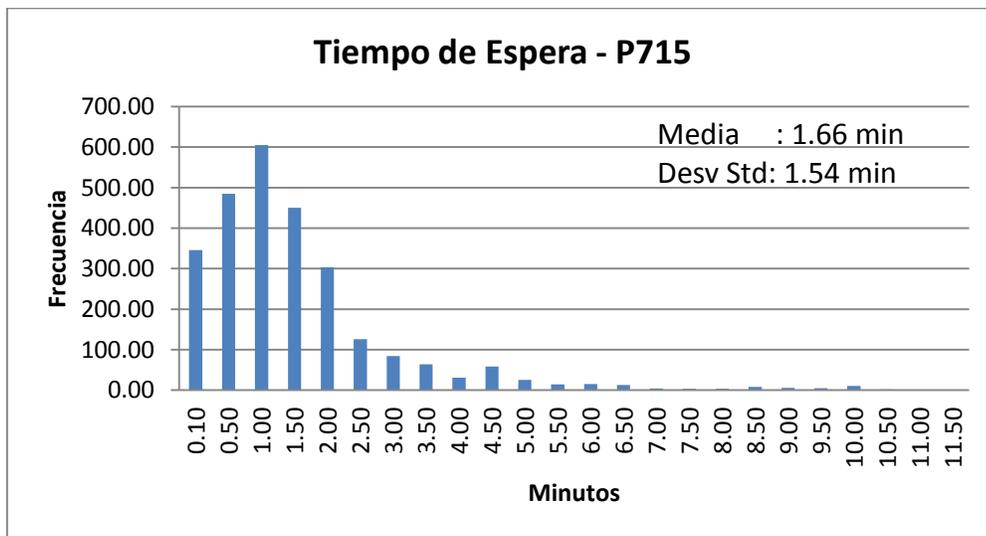
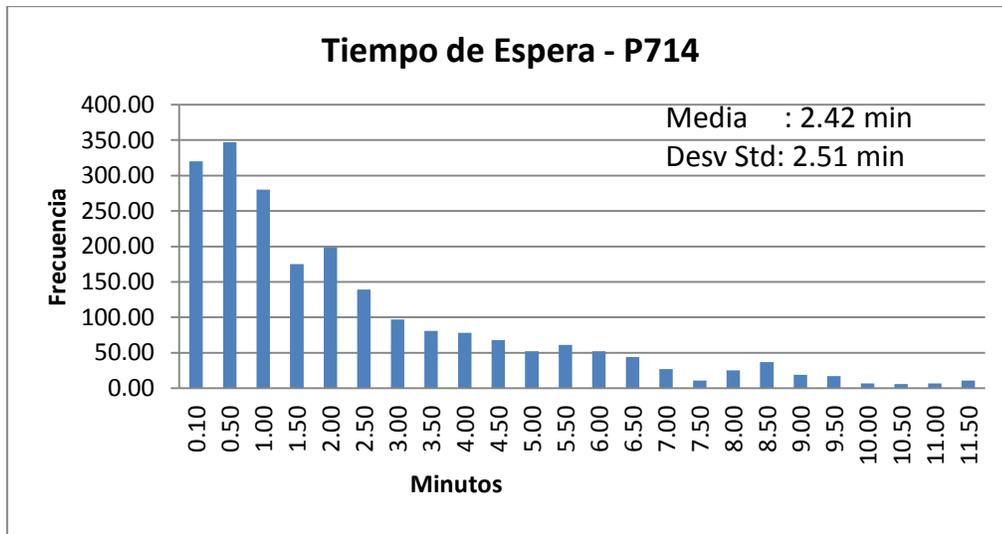




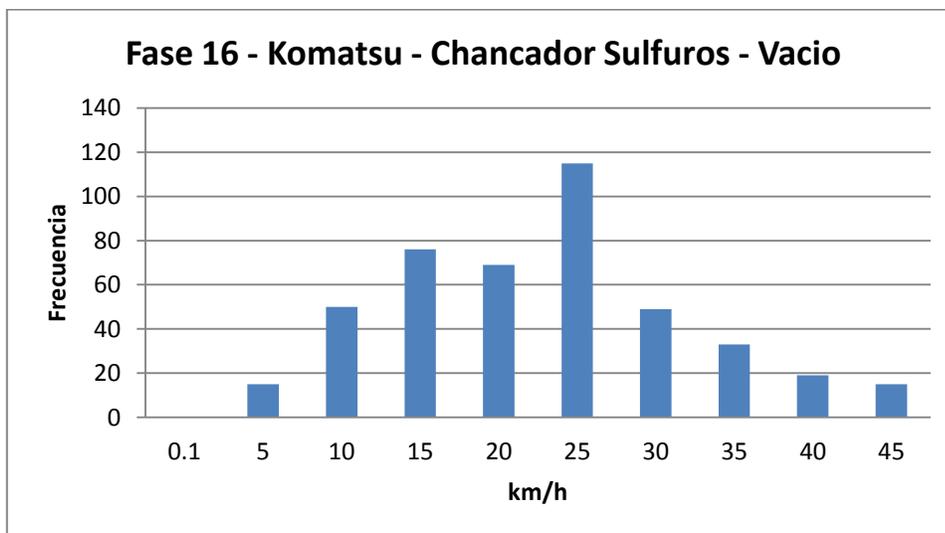
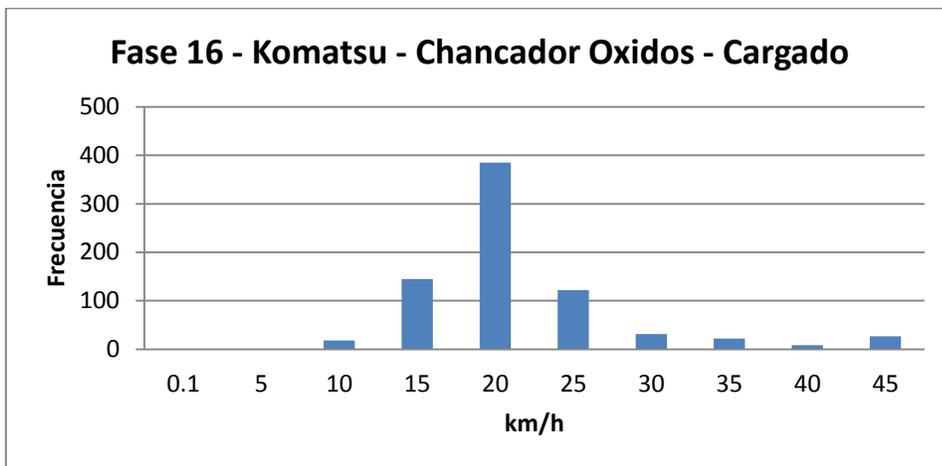
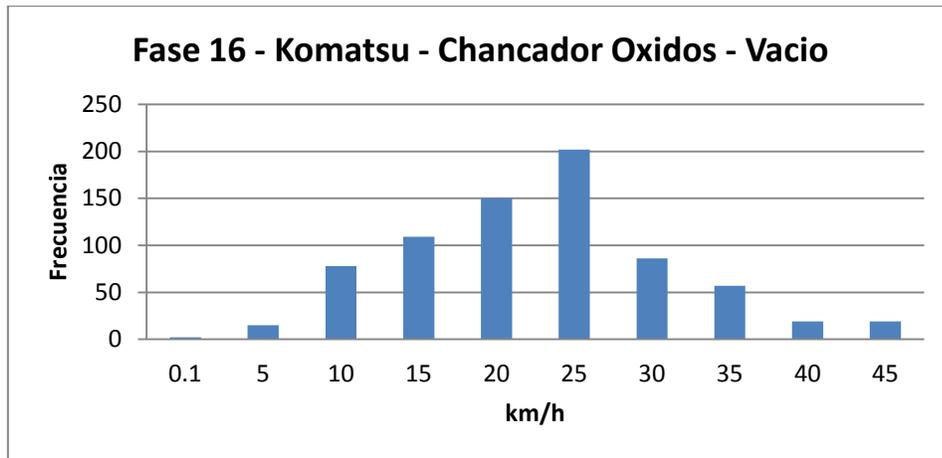




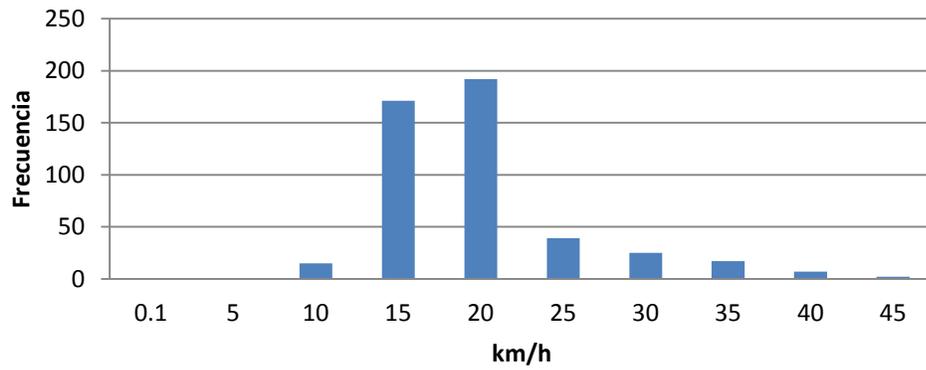




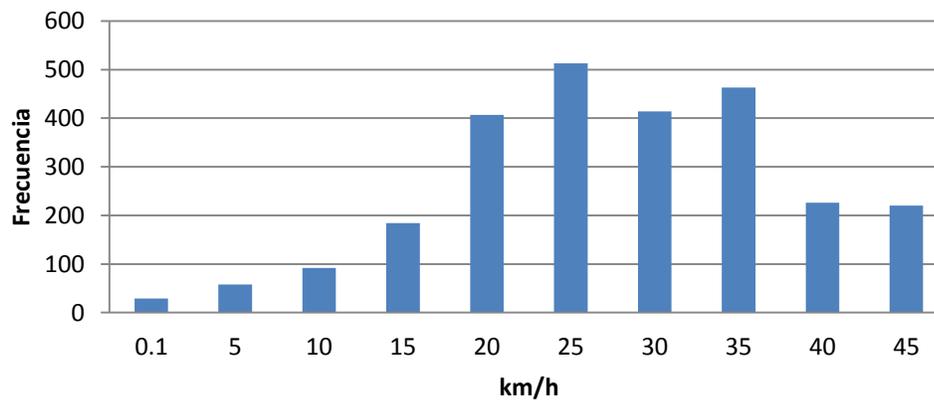
A.3 Histogramas de velocidades – Origen Destino, ejemplos



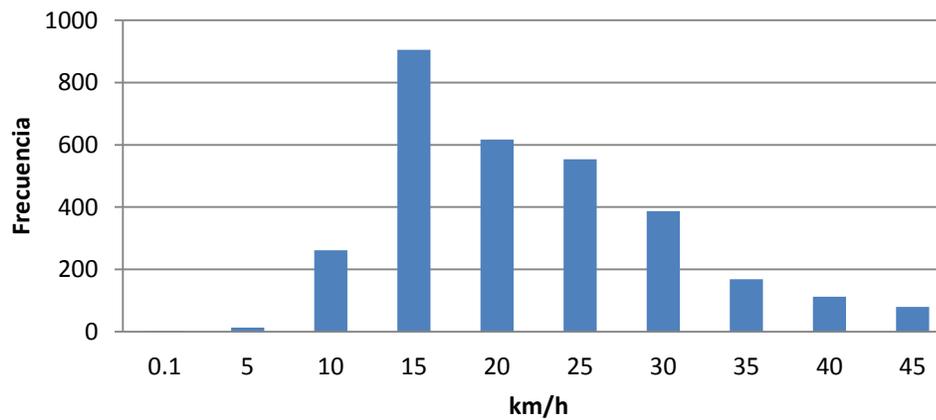
Fase 16 - Komatsu - Chancador Sulfuros - Cargado



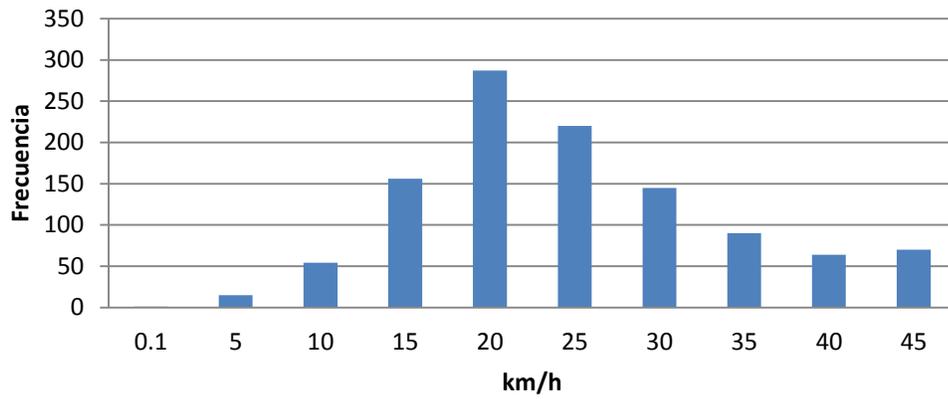
Fase 17 - Komatsu - Botadero Norte - Vacio



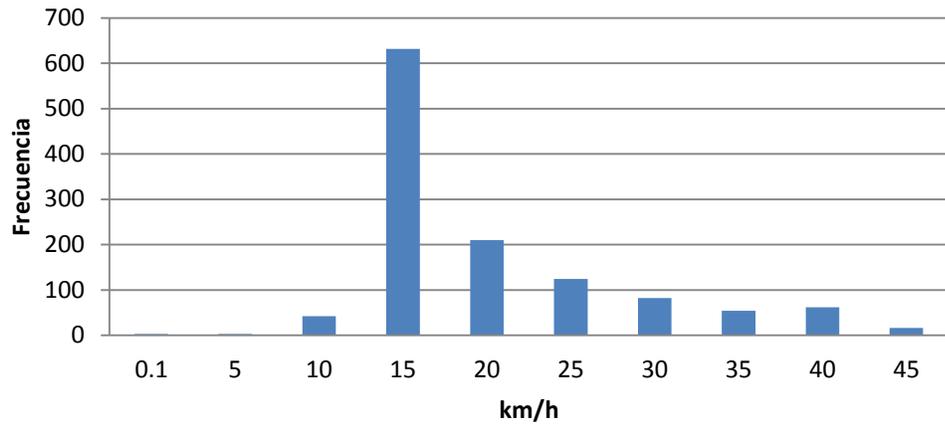
Fase 17 - Komatsu - Botadero Norte - Cargado



Fase 32 - Komatsu - Chancador Sulfuros - Vacío



Fase 32 - Komatsu - Chancador Sulfuros - Cargado



A.4 Código de programación modelo de Elbrond, lenguaje VBA.

Caso ejemplo: 1 pala sin segundo servidor

```
Sub elbrond_simple()
```

```
Dim k As Variant
```

```
Dim N As Variant
```

```
Dim TC As Variant
```

```
Dim STC As Variant
```

```
Dim TVV As Variant
```

```
Dim STVV As Variant
```

```
Dim TVC As Variant
```

```
Dim STVC As Variant
```

```
Dim TA As Variant
```

```
Dim STA As Variant
```

```
Dim TD As Variant
```

```
Dim STD As Variant
```

```
Dim TAP As Variant
```

```
Dim STAP As Variant
```

```
'indices'
```

```
Dim i As Variant
```

```
Dim f1 As Variant
```

```
Dim p1 As Variant
```

```
Dim s1 As Variant
```

```
Dim j As Variant
```

```
Dim f2 As Variant
```

Dim p2 As Variant

Dim s2 As Variant

'Resultados'

Dim WS As Variant

Dim WB As Variant

Dim WP As Variant

Dim WA As Variant

Dim rop As Variant

Dim roa As Variant

N = Sheets("Elbrond - Simple").Range("J5").Value

TC = Sheets("Elbrond - Simple").Range("B2").Value

STC = Sheets("Elbrond - Simple").Range("B3").Value

TVV = Sheets("Elbrond - Simple").Range("B5").Value

STVV = Sheets("Elbrond - Simple").Range("B6").Value

TVC = Sheets("Elbrond - Simple").Range("F2").Value

STVC = Sheets("Elbrond - Simple").Range("F3").Value

TA = Sheets("Elbrond - Simple").Range("J2").Value

STA = Sheets("Elbrond - Simple").Range("J3").Value

TD = Sheets("Elbrond - Simple").Range("N2").Value

STD = Sheets("Elbrond - Simple").Range("N3").Value

TAP = Sheets("Elbrond - Simple").Range("F5").Value

STAP = Sheets("Elbrond - Simple").Range("F6").Value

RT = TVC + TA + TD + TVV

SRT = (STVC ^ 2 + STA ^ 2 + STD ^ 2 + STVV ^ 2) ^ 0.5

TC1 = TC + TAP

STC1 = (STC ^ 2 + STAP ^ 2 + STAP ^ 2) ^ 0.5

k = TC1 / RT

i = 1

p1 = 1

s1 = 0

Do Until (i = N) 'cálculo del WP'

f1 = (N - i + 1) * k

p1 = p1 * f1

s1 = p1 + s1

i = i + 1

Loop

s1 = s1 + 1

rop = 1 - (1 / s1)

WP = N * (TC1 / rop) - (TC1 + RT)

$j = 1$

$p2 = 1$

$s2 = 0$

Do Until (j = N) 'cálculo del WA'

$f2 = (N - j) * (\text{Exp}(k * j) - 1) / j$

$p2 = p2 * f2$

$s2 = p2 + s2$

$j = j + 1$

Loop

$s2 = s2 + 1$

$roa = (1 + 1 / (N * k * s2)) ^ (-1)$

$WA = N * (TC1 / roa) - (TC1 + RT)$

'cálculo de WB'

$WB = N * TC1 - (TC1 + RT)$

If (WB < 0) Then

WB = 0

End If

'cálculo de WS'

$WS = WP * (STC1 / TC1) + 2 * (WA * (1 - (STC1 / TC1))) * (SRT / RT) + WB * (1 - (STC1 / TC1)) * (1 - 2 * (SRT / RT))$

'Visualizador'

Sheets("Elbrond - Simple").Range("B9").Value = WP

Sheets("Elbrond - Simple").Range("B10").Value = WA

Sheets("Elbrond - Simple").Range("B11").Value = WB

Sheets("Elbrond - Simple").Range("B13").Value = WS

End Sub

A.5 Tiempos de ciclo por pala – 2018

Febrero 2018

	TC	STC	TVC	STVC	TA Ch	STA Ch	TD	STD	TVV	STVV	TA Carg	STA Carg	T. Ciclo
P1 73	1.79	1.13	21.32	8.24	0.44	0.48	2.20	2.69	14.75	5.55	0.73	0.86	41.23
P2 73	1.79	1.13	28.92	9.16	0.45	0.49	2.15	2.61	20.54	6.57	0.73	0.86	54.58
P3 73	1.79	1.13	15.99	4.76	0.37	0.59	1.15	1.31	11.45	3.48	0.73	0.86	31.48
P4 73	1.79	1.13	18.99	5.94	0.33	0.58	1.07	1.27	13.51	4.28	0.73	0.86	36.42
P5 73	1.79	1.13	14.45	3.55	0.49	0.60	1.40	1.46	10.63	2.75	0.73	0.86	29.49
P6 73	1.79	1.13	14.48	3.56	0.49	0.60	1.39	1.46	10.64	2.75	0.73	0.86	29.52
P7 73	1.79	1.13	28.48	8.92	0.43	0.47	2.22	2.72	20.27	6.42	0.73	0.86	53.92
P1 50	2.80	1.47	26.41	7.26	0.59	0.58	1.79	1.85	19.13	5.44	0.67	0.75	51.39
P2 50	2.80	1.47	18.87	4.57	0.57	0.61	1.55	1.54	13.90	3.55	0.67	0.75	38.36
CF 1	5.58	2.75	16.03	4.35	0.43	0.59	1.27	1.39	11.63	3.27	0.71	0.87	35.63
CF 2	5.58	2.75	19.91	6.46	0.30	0.58	1.02	1.23	14.10	4.60	0.71	0.87	41.60
CF 3	4.36	3.14	28.72	9.10	0.45	0.48	2.19	2.66	20.40	6.53	0.69	0.77	56.80
CF 4	4.36	3.14	24.40	8.60	0.43	0.47	2.22	2.72	17.08	5.96	0.69	0.77	49.18

Junio 2018

	TC	STC	TVC	STVC	TA Ch	STA Ch	TD	STD	TVV	STVV	TA Carg	STA Carg	T. Ciclo
P1 73	1.79	1.13	21.14	7.89	0.49	0.51	2.09	2.44	14.69	5.37	0.73	0.86	40.93
P2 73	1.79	1.13	30.38	9.05	0.43	0.48	2.17	2.66	21.77	6.62	0.73	0.86	57.27
P3 73	1.79	1.13	18.31	5.45	0.30	0.58	1.02	1.23	13.12	3.99	0.73	0.86	35.26
P4 73	1.79	1.13	19.60	5.46	0.40	0.59	1.24	1.38	14.17	4.08	0.73	0.86	37.93
P5 73	1.79	1.13	18.09	4.77	0.43	0.59	1.31	1.42	13.18	3.62	0.73	0.86	35.53
P6 73	1.79	1.13	17.34	4.38	0.44	0.59	1.32	1.43	12.70	3.37	0.73	0.86	34.31
P7 73	1.79	1.13	30.38	9.05	0.45	0.48	2.18	2.65	21.77	6.62	0.73	0.86	57.30
P1 50	2.80	1.47	19.19	4.51	0.63	0.61	1.66	1.62	14.19	3.54	0.67	0.75	39.15
P2 50	2.80	1.47	19.88	4.61	0.61	0.61	1.62	1.59	14.73	3.63	0.67	0.75	40.31
CF 1	5.58	2.75	30.42	9.06	0.43	0.48	2.22	2.72	21.79	6.62	0.71	0.87	61.14
CF 2	5.58	2.75	21.51	6.89	0.34	0.58	1.10	1.29	15.25	4.93	0.71	0.87	44.48
CF 3	4.36	3.14	29.92	8.91	0.42	0.48	2.12	2.60	21.44	6.51	0.69	0.77	58.94
CF 4	4.36	3.14	21.10	7.88	0.50	0.51	2.08	2.42	14.66	5.36	0.69	0.77	43.38

Octubre 2018

	TC	STC	TVC	STVC	TA Ch	STA Ch	TD	STD	TVV	STVV	TA Carg	STA Carg	T. Ciclo
P1 73	1.79	1.13	22.24	8.30	0.43	0.47	2.22	2.72	15.45	5.65	0.73	0.86	42.86
P2 73	1.79	1.13	33.86	10.85	0.43	0.47	2.22	2.72	24.02	7.76	0.73	0.86	63.05
P3 73	1.79	1.13	18.82	5.75	0.31	0.58	1.04	1.24	13.43	4.17	0.73	0.86	36.12
P4 73	1.79	1.13	19.34	5.39	0.44	0.59	1.31	1.42	13.98	4.02	0.73	0.86	37.59
P5 73	1.79	1.13	20.42	6.00	0.43	0.59	1.29	1.40	14.66	4.41	0.73	0.86	39.32
P6 73	1.79	1.13	17.41	4.40	0.48	0.59	1.39	1.48	12.75	3.38	0.73	0.86	34.56
P7 73	1.79	1.13	33.22	10.52	0.44	0.48	2.20	2.68	23.60	7.55	0.73	0.86	61.98
P2 50	2.80	1.47	23.42	5.67	0.39	0.58	1.38	1.56	17.25	4.41	0.67	0.75	45.92
CF 1	5.58	2.75	19.12	5.84	0.30	0.58	1.02	1.23	13.65	4.24	0.71	0.87	40.36
CF 2	5.58	2.75	18.38	4.92	0.46	0.59	1.35	1.45	13.36	3.71	0.71	0.87	39.83
CF 3	4.36	3.14	32.81	10.27	0.43	0.47	2.22	2.72	23.34	7.39	0.69	0.77	63.84
CF 4	4.36	3.14	33.53	10.75	0.43	0.48	2.22	2.72	23.78	7.68	0.69	0.77	64.99

Diciembre 2018

	TC	STC	TVC	STVC	TA Ch	STA Ch	TD	STD	TVV	STVV	TA Carg	STA Carg	T. Ciclo
P1 73	1.79	1.13	21.91	8.18	0.45	0.48	2.18	2.64	15.23	5.57	0.73	0.86	42.29
P2 73	1.79	1.13	34.34	11.26	0.43	0.47	2.22	2.72	24.28	7.99	0.73	0.86	63.78
P3 73	1.79	1.13	16.22	4.83	0.39	0.59	1.20	1.34	11.62	3.53	0.73	0.86	31.95
P4 73	1.79	1.13	17.64	4.46	0.45	0.59	1.35	1.45	12.92	3.42	0.73	0.86	34.88
P5 73	1.79	1.13	17.94	4.80	0.51	0.60	1.43	1.49	13.05	3.63	0.73	0.86	35.45
P6 73	1.79	1.13	18.44	4.93	0.47	0.59	1.38	1.46	13.41	3.73	0.73	0.86	36.22
P7 73	1.79	1.13	34.12	10.94	0.43	0.47	2.22	2.72	24.20	7.82	0.73	0.86	63.50
P1 50	2.80	1.47	20.57	5.89	0.42	0.59	1.27	1.40	14.82	4.36	0.67	0.75	40.55
P2 50	2.80	1.47	23.89	6.30	0.51	0.58	1.57	1.68	17.40	4.78	0.67	0.75	46.83
CF 1	5.58	2.75	19.12	5.84	0.30	0.58	1.02	1.23	13.65	4.24	0.71	0.87	40.36
CF 2	5.58	2.75	24.62	8.07	0.32	0.58	1.08	1.28	17.41	5.73	0.71	0.87	49.71
CF 3	4.36	3.14	34.12	10.94	0.43	0.47	2.22	2.72	24.20	7.82	0.69	0.77	66.02
CF 4	4.36	3.14	34.22	11.10	0.43	0.47	2.22	2.72	24.23	7.90	0.69	0.77	66.15