



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis Doctor en Control de Sistemas

**Simulación y Diseño de Metodologías de
Despacho de Cargas**

Ing. Ariel E. Arelovich

BAHÍA BLANCA

ARGENTINA

2012

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Control de Sistemas, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica , dependiente del Departamento de Ingeniería eléctrica y computadoras durante el período comprendido entre el 16 de Septiembre del 2008 y el 7 de Diciembre del 2012, bajo la dirección del Dr. Osvaldo E. Agamennoni y del Dr. Jose Luis Figueroa.

Bahía Blanca, 7 de Diciembre de 2012

Ariel E. Arelovich



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/..../..... , mereciendo la calificación de(.....)

Resumen

Los problemas de distribución de vehículos son importantes en la ciencia de la computación por su aplicación directa en los campos del transporte de material y el control de tráfico. Esto se debe a que proveen un marco formal con el cual estudiar estas temáticas, las cuales tienen gran impacto económico y forman una parte importante de la sociedad.

En particular, la problemática de la selección de destinos tiene un gran impacto en la industria de la minería, donde es conocida como despacho y en la cual el transporte del material puede llegar a significar hasta un 50% del costo de la operación, el cual se hace habitualmente con una flota de camiones especiales. Por lo tanto, cualquier metodología que permita aumentar la eficiencia de la operación es particularmente útil.

El estudio bibliográfico realizado ha mostrado un conjunto acotado de enfoques hacia este problema, generalmente a través la utilización de herramientas matemáticas formales. Mas aún, las técnicas presentadas en ellos han limitado la capacidad de acción del sistema simplemente a asignarle el próximo destino a un camión que acabó de cargar o descargar. Esto provee la motivación fundamental del presente trabajo. La emergencia y progreso de las tecnologías de comunicación provee la posibilidad de acceder a mayor cantidad de información de forma instantánea a la vez que permite enviar y distribuir instrucciones a cualquier vehículo. Esto implica que la metodología de despacho podría especificar como el vehículo debe llegar al destino que se le asignó.

En este trabajo se presentan tres aportes principales. El primero es la definición de un marco de referencia uniforme que permita la evaluación simple y rápida de una

metodología de despacho de acuerdo a cuatro índices de desempeño que cuantifican la eficiencia de la operación minera. Este marco incluye un conjunto de condiciones de borde que definen un entorno de simulación y un modelo de movimiento simplificado que calcula las variables mínimas indispensables para representar el viaje de un vehículo, utilizando muy pocos datos. Además se diseñó un modelo de conductor de un solo parámetro que permite definir tres comportamientos, que son los únicos necesarios lograr evaluar correctamente la eficiencia de una metodología de despacho.

El segundo aporte es un nuevo enfoque al estudio del despacho. Se propone utilizar un secuencia de selección de destinos fija y analizar el comportamiento del flujo de vehículos para poder predecir la productividad y el tiempo de ocio del equipamiento. Con este modelo, se diseñan secuencias que permitan maximizar el primero y minimizar el segundo.

El tercer aporte es la utilización de la información global del estado de la mina, en un instante, para calcular la velocidad óptima para cada vehículo de forma de eliminar los tiempos de espera y reducir el consumo de combustible.

Estas herramientas son combinadas en un simulador en el cual se utilizan dos metodologías propuestas y se comparan con métodos existentes que se pueden hallar en la literatura. Los resultados son expuestos y analizados para luego sacar las conclusiones correspondientes.

Abstract

Vehicle distribution problems are important in computer science because of their direct application in the fields of transportation and traffic flow. This is due to the fact that they provide a formal framework in which to study these problems, which have a great economic and social impact.

The destination selection problem is particularly important in the mining industry, where it is known as dispatching. In this industry, it is usually a fleet of off-highway haul trucks that is tasked with material transportation which can amount to as much as 50 % of the operational costs. This makes particularly useful any methodology that allows an increase in the efficiency of the operation.

The literature review has shown a reduced set of approaches used to solve this problem, mostly through the utilization of formal mathematical tools. The techniques presented in these works are limited in their control of the operation since they only choose where to send a truck to load or unload. This provides the fundamental motivation of this work. The emergence and progress in communications technology has created the possibility of instantaneously accessing greater amounts of information as well as the ability to send specific instructions to individual vehicles. This implies that is possible to specify how a vehicle should travel to its specified destination.

This work contains three fundamental contributions. The first is the definition of a standard framework which allows for a fast, simple evaluation of a dispatching technique by using four performance indexes that quantify the efficiency of a mining operation.

This framework includes a set of border conditions that define a simulation environment and a simple movement model that calculates only the indispensable variables needed to represent a traveling truck, using a reduced parameter set. Furthermore, the driver is also modeled using only one parameter which allows for the definition of all the behaviors necessary to represent the fundamental aspects needed for correctly evaluating the efficiency of a dispatching methodology.

The second contribution is a new approach to the dispatching problem, in which a fixed sequence for destination selection is used to analyze the behavior of the resulting vehicle flow in order to predict the expected productivity and equipment idle time. Using these predictions it is possible to design the sequence in such a way as to maximize the former and minimize the latter.

The third contribution is the utilization of the mine state, which is the location, speed and destination of all the trucks in the mine, in order to calculate the best velocity needed by all vehicles to minimize truck waiting time and fuel consumption.

All of these contributions are combined in a simulator in which two resulting dispatching methodologies are compared against existing techniques that are found in the literature. The results are presented and analyzed to draw the proper conclusions.

Agradecimientos

Intentar agradecer a todas las personas que correspondería resultaría en un documento de mayor longitud que el resto de ésta tesis. Por lo tanto, y con gran dolor por la gente que no podré nombrar, deberé confeccionar una lista resumida. En primer lugar, siempre, está mi familia. Mis padres me trajeron al mundo y me dieron los valores que me han transformado en la persona que soy. Estoy aquí gracias a ellos. Mi hermana siempre fue una inagotable fuente de apoyo sin importar las distancias.

No tengo idea si esto hubiese sido posible sin mis compañeros de la universidad, pero definitivamente hubiese sido un desafío mucho menos grato sin su presencia. Me he tomado la libertad de requerir de sus conocimientos u opiniones a todos ellos uno por uno a lo largo de estos últimos años. Gracias a todos y cada uno de ellos.

Tengo la fortuna de que la vida fuera de la universidad también me haya provisto de una gran cantidad de amigos que se han interesado y me han seguido a lo largo de esta etapa de mi vida. Tomo ésta oportunidad para hacerles saber cuanto significan para mi.

El destino no solo me ha brindado dos magníficas personas para que me dirijan sino que, además, he tenido un tercer guía que me ha tratado como si fuera su alumno sólo por su bondad y preocupación. Ellos me han brindado incontables horas de reuniones, llamadas, quejas y de opiniones.

A Osvaldo le agradezco profundamente su tiempo y paciencia que han sabido llevarme por este camino de forma exitosa. Las palabras no son suficientes para expresar mi aprecio. Pero me interesa que sepa cuanto agradezco de su tiempo y apoyo.

Muchas han sido las veces que he visitado a José para charlar, para mantenerlo al tanto y para pedir su opinión. Sus respuestas siempre fueron rápidas, concretas y útiles. Expreso aquí mi agradecimiento y respeto.

De Favio he buscado su opinión en lo profesional y en lo personal en más ocasiones de las que estoy seguro acordarme. Fue mi tercer director y por más que lo mencione, nunca haré mérito a su bondad. Caminó al lado mío y no tenías por que hacerlo. Muchas gracias.

Finalmente, me gustaría agradecer al jurado: Dr. Pablo Mandolesi, Dr. Vicente Mut y Dr. José Guivant, por haberse tomado el tiempo de leer éste trabajo, por sus palabras de elogio y crítica y por haber participado en la etapa final.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Estado del arte	4
1.2. Motivaciones y objetivos	9
1.3. Estructura de la tesis	12
2. Entorno estándar de evaluación	15
2.1. Nociones básicas	15
2.2. Índices de desempeño	19
2.3. Pautas de una operación minera.	23
2.4. Modelo y Algoritmos	27
2.4.1. Modelo de movimiento de un vehículo.	29
2.4.1.1. Regla 1: Fuerza constante	33
2.4.1.2. Regla 2: Potencia constante	33
2.4.1.3. Regla 3: Fuerza lineal	35
2.4.2. Algoritmos de comportamiento de un conductor	36
2.4.2.1. Llegar a la velocidad objetivo y mantenerla	36
2.4.2.2. Llegar con velocidad nula al fin del camino	38
2.4.2.3. Frenar para evitar colisiones.	41
3. Selección de destinos	47

3.1. Motivación	47
3.2. Secuencia de despacho	48
3.2.1. Ciclo para un solo vehículo	51
3.2.2. Ciclo para una flota de tamaño N	53
3.3. Modelo de productividad para una secuencia	56
3.4. Secuencia de despacho a partir de una solución	57
3.5. Algoritmos para el cálculo de soluciones	58
3.5.1. Maximizar productividad (MP)	58
3.5.2. Minimizar tiempos de ocio de los nodos (MI)	59
3.6. Metodologías de referencia	63
3.6.1. Minimizar el tiempo de espera de un camión (EC)	63
3.6.2. Cola mas corta (CM)	64
3.6.3. Programación Lineal (PL)	65
4. Política de Velocidad	69
4.1. Nociones básicas	69
4.2. Pautas para el ajuste de velocidad.	70
4.3. Cálculos de velocidad	74
5. Resultados	81
5.1. Parámetros generales de simulación	81
5.2. Desempeño del modelo	83
5.2.1. Experiencia 1: Simulación de caravana en peor caso	83
5.2.2. Experiencia 2: Aceleraciones razonables.	86
5.2.3. Experiencia 3: Comparación con datos reales	88
5.3. Desempeño de técnicas de despacho	89
5.3.1. Mina Ejemplo 1	92
5.3.2. Mina Ejemplo 2	96

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	XI
5.3.3. Mina Ejemplo 3	99
5.3.4. Mina Ejemplo 4	105
5.3.5. Resultados Globales	109
6. Conclusiones y trabajo futuro	115
6.1. Conclusiones	115
6.2. Trabajos a futuro.	122
A. Pendiente por defecto	125
B. Pendiente de freno de un camión líder	127
C. Pendiente de freno de un camión seguidor	133
D. Distancia de seguridad	141
E. Descripciones de minas ejemplo.	143

Capítulo 1

Introducción

La administración logística es el proceso de planear, implementar y controlar en forma efectiva y eficiente el flujo y almacenamiento de bienes, servicios y la información relacionada con ellos. Este control se realiza desde un punto de origen a un punto donde estos deben ser consumidos [1]. El objetivo de este proceso es la minimización de los costos involucrados tanto en la administración de materias primas, su transporte y procesamiento hasta la entrega de un producto final. Si bien esta disciplina naturalmente abarca una gran cantidad de problemáticas, ésta tesis se dedica al estudio de los problemas de distribución de vehículos (del inglés *Vehicle Routing Problems* o VRP), que forman un punto importante en la solución de problemas de logística. Estos problemas lidian con la selección de destinos para una flota de vehículos de forma de optimizar algún valor de mérito. Los objetivos pueden incluir, la minimización del tiempo o combustible necesario así como maximizar la ganancia. Formalmente son problemas de optimización combinatoria y de programación de enteros.

La selección de destinos propiamente dicha también se la conoce como *despacho* [2]. Ésta es crucial por que tendrá un impacto directo en los tiempos de espera de los vehículos en los distintos destinos, la distancia que recorrerán, así como el mínimo tamaño de flota que será necesaria para poder cumplir con las restricciones de un problema particular.

Una vez que el destino se ha seleccionado, también es importante el cálculo del camino óptimo. Tradicionalmente esto implica elegir un trayecto que minimice la distancia. Sin embargo, es posible que desde un punto de vista de costo sea más efectivo elegir caminos que insuman menos tiempo, o tal vez que pasen a través de determinadas rutas ya que tendrán un impacto de largo plazo sobre el mantenimiento de los vehículos o sobre la función objetivo que se intenta optimizar. El transporte por camiones de ruta, taxis, transporte por barcos, correo o la minería son ejemplos de industrias que deben resolver este tipo de problemáticas a menudo.

En la minería el problema de despacho es de particular interés. Las explotaciones mineras de cobre, oro, carbón, granito, arcilla y varios otros minerales se llevan a cabo a cielo abierto [3]. En estos ambientes es común el uso de camiones especiales que transportan hasta 300 toneladas de roca. El material se extrae por diversos métodos siendo el más común el uso de palas mecánicas. Estas rocas deben ser llevadas hasta una ubicación que debe procesarlas o a un almacenamiento temporal. Debido al inmenso costo de compra y mantenimiento de estos vehículos, el transporte del material representa hasta una 50 % de los costos de operación de la mina [4]. Por lo tanto la optimización del flujo de vehículos es fundamental para una operación eficiente.

Sin embargo, existen determinadas particularidades del ambiente en una operación minera que potencialmente simplifican el problema a la vez que agregan nuevas restricciones [2]. Por un lado los posibles destinos son acotados. Un camión cargado sólo puede ir a un punto de descarga y uno vacío sólo puede ir a un punto de carga. Esto se desprende de que los vehículos siempre se cargan cerca de su máxima capacidad por lo que, a continuación, deberán vaciar su contenido obligatoriamente previo a visitar otro punto de carga. Además los tiempos de viaje son cortos en comparación de la duración de un turno y la demanda es constante. Esto hace que en el corto plazo sea posible prever la formación de colas con cierta certeza, si bien en el largo plazo el comportamiento del flujo de vehículos es estocástico.

Existen varias herramientas matemáticas que permiten resolver formalmente el problema dentro de determinadas restricciones y con distintos objetivos. Por ejemplo, al intentar minimizar el tamaño de la flota es común la utilización de programación mixta de enteros [5], ya que es necesario obtener el número de vehículos necesario para cumplir con las restricciones impuestas. Así mismo si el objetivo es maximizar la productividad dada una flota, puede ser utilizada programación lineal y no lineal tradicional (para teoría de estos métodos ver [6] y [7]). Estos métodos permiten contemplar una gran cantidad de parámetros y existen algoritmos bien definidos para resolverlos. Sin embargo, su efectividad va a estar limitada inherentemente por el modelo que se utiliza para plantear el problema. Este hecho, permite intentar enfocar el despacho desde un punto de vista más abstracto obteniendo, igualmente, resultados significativos.

Además de las herramientas formales, las reglas heurísticas son muy utilizadas. Esto es porque su implementación es mucho más simple y su desempeño en determinadas situaciones puede compararse a una metodología más complicada.

Existen soluciones comerciales que permiten el despacho eficiente en una mina. El más conocido a nivel mundial es el DISPATCH TM de Modular que comenzó con la aplicación de una solución de programación lineal [8] [9]. El sistema SmartMine TM de la empresa brasileña Devex permite realizar optimización a través de simulación y del uso de datos en tiempo real. Uno de los servicios importantes que se proveen es el control de calidad del mineral extraído. Dependiendo de donde se extraiga la roca será el grado que tenga la misma. Este grado es el porcentaje de mineral útil en el volumen excavado. En muchos casos, por cuestiones de rentabilidad, es importante mantener un grado determinado de forma constante del material extraído y esto funciona generalmente como una restricción en el planeamiento global de la mina y en su estrategia de despacho. Sin embargo, una vez que una mina está diseñada y es funcional, las decisiones que se toman siguen estando limitadas a la selección de destinos a los cuales deben dirigirse los vehículos cuando en la actualidad, gracias a las tecnologías de comunicaciones emergentes, se han hecho posible

otros factores de control.

1.1. Estado del arte

Las metodologías de despacho han sido desarrolladas desde el comienzo de las operaciones mineras. Previo a la existencia de sistemas por computadora, esto se realizaba directamente por recomendaciones de un humano. Como este trabajo se concentrará en metodologías modernas de despacho se hará una breve descripción sólo de los métodos completamente automatizados para resolver este problema.

La forma mas simple de implementar un sistema de despacho en tiempo real es la utilización de una regla heurística. Aquí se enumeran algunas de las mas comunes.

1. Asignación fija de camiones.
2. Minimizar el tiempo de espera de un camión.
3. Minimizar el tiempo de espera de una pala.
4. Maximizar la productividad momentánea de cada camión.
5. Minimizar la desviación del objetivo de producción.

En general, las heurísticas que minimizan los tiempos de espera de los vehículos son mejores en operaciones con flotas pequeñas. A su vez las técnicas que reducen el tiempo de ocio de las palas son mas propicias en minas con flotas grandes [8]. Una flota puede ser considerada como grande o pequeña dependiendo del tamaño de la mina. Sin embargo, las reglas heurísticas no poseen una visión global del sistema y por este motivo puede ser que una decisión que parezca buena en el corto plazo, en realidad, aleje al sistema de su óptimo [2]. Aún así, estas reglas son muy útiles para establecer referencias con las cuales medir el desempeño de otras metodologías.

Los sistemas multietapa son considerados mejores que las reglas heurísticas [8] [2], justamente por tener una visión estratégica global de la operación. En general están compuestos de dos partes. La primera realiza una distribución de los recursos de transporte y se la conoce como etapa de planeamiento, mientras que la segunda parte realiza la asignación en tiempo real de vehículos, y esta es conocida como despacho. De acuerdo a [8], DISPATCHTM plantea y resuelve dos segmentos de programación lineal para realizar su planeamiento. El primero de estos, resuelve la tasa óptima de producción para las palas funcionando en puntos de extracción y en los lugares de almacenamiento. El segundo problema utiliza los resultados del primer segmento como restricción para maximizar la producción por camión, resultando en un volumen objetivo para cada camino que haya entre una pala y un punto de descarga. Con estos valores, el despacho en tiempo real lo realiza con una filosofía de asignar el camión que está en las condiciones óptimas para viajar por el camino que está más alejado de su objetivo de producción. En [2] se realiza un comentario interesante, al observar que la metodología de despacho en tiempo real, tiene más en común con un sistema heurístico que con la resolución exacta de un problema de optimización.

En [8] se analizan varios trabajos que proveen sistemas multietapa, llegando a la siguiente conclusión acerca de los modelos de programación lineal. Éstos modelos implícitamente suponen que la producción de una fuente de carga es proporcional al nivel de flujo de transporte que se le asigna, ignorando que al enviar una mayor cantidad de vehículos a una misma pala se introducen tiempos de espera mayores. En [10] esto se tuvo en cuenta al utilizar teoría de colas para predecir los tiempos de espera. El autor también menciona la necesidad de que el plan operacional sea realista y la necesidad de adaptación a imprevistos ya que las condiciones pueden cambiar rápidamente.

Dos aspectos importantes del despacho de camiones es la variabilidad de las necesidades de una mina particular (que hace muy complejo estimar tamaños de flotas) y la optimización de objetivos múltiples [2]. Además el comportamiento de cada uno de los

camiones de forma individual y diversas condiciones del entorno hacen que no sea factible realizar predicciones efectivas de cuanto mejorará una operación minera por el uso de una técnica de despacho determinada. Estos motivos hacen que las simulaciones sean una herramienta necesaria para poder evaluar el desempeño en una operación minera [11].

A continuación se resaltan algunos de los resultados mas destacados o innovadores de los trabajos que se han enfocado en distintos aspectos del problema de despacho en minas.

En [12] se intenta maximizar la producción en toneladas de carga además de satisfacer los requerimientos de grado resolviendo un modelo de programación de metas, calculando las toneladas que deben ser transportadas entre cada pala y punto de descarga. Un modelo de programación de metas es un problema de programación lineal que usa penalizaciones en la función objetivo. La ventaja es que algunas restricciones pueden ser no respetadas, pero esto se mantiene en un mínimo. El fin de esta metodología es mantener los objetivos de mezcla y las palas lo mas ocupadas posibles. Se tuvieron en cuenta los niveles mínimos de producción de una pala, la capacidad de los puntos de descarga, la proporción mineral/deshecho y la capacidad total de la flota. Para la implementación del despacho en tiempo real, se parte del planteo de que la demanda de las palas son la cantidad de camiones necesarios para llegar a los niveles de producción que resultaron de la resolución del primer segmento de programación lineal. El costo de enviar un camión a una pala es el tiempo de espera que resultará de la asignación, por lo que las asignaciones se harán intentando minimizar estos tiempos de ocio. Sin embargo, este método requiere que el tiempo de espera de un camión en una pala sea independiente de las asignaciones de otros camiones a la misma pala. Como esto no es verdad, las decisiones se basarán en tiempos de espera subestimados.

En [13] se presenta un procedimiento para un sistema de despacho en tiempo real que se adapte a las variaciones de una operación para asegurar la optimización, basándose

en el comportamiento de colonias de hormigas. De acuerdo al autor, la demanda de una pala por camiones dependerá de la calidad del material que exista en el bloque del cual se extrae. La prioridad que se le da a dicho bloque en un plan de corto término depende del tiempo de carga de la pala y de la longitud de la cola en la pala. La respuesta de un camión a la demanda de una pala dependerá de la distancia a la que se encuentre, de cuan cargado esté, de su velocidad y tiempo de descarga. Estos parámetros se utilizan para la creación de una función de probabilidad que es análoga a las respuestas de hormigas ante la posibilidad de hacer una determinada tarea y su aptitud para realizarla. Esencialmente, las palas realizan pedidos de camiones, y aquél que tenga un resultado de mayor valor en la función de respuesta será el que acuda a la pala. El trabajo supone que se realizó un planeamiento previo que incluyó la asignación de prioridades a las palas y el volumen de producción objetivo.

En [14] se utiliza un algoritmo genético para optimizar la asignación de los camiones a los caminos de tal forma que se cumpla con la demanda de los puntos de descarga manteniendo el costo del mantenimiento y transporte al mínimo. Esto es logrado utilizando una función objetivo que es la suma pesada del costo de mantenimiento y el costo del transporte.

En [15] se concentra en proveer un modelo de programación matemática que sea mas completo y mas fiel a la realidad. En particular se le da el enfoque a resolver el problema de planeamiento. Por lo que sus objetivos son determinar la tasa de extracción de los pozos que contienen mineral y piedra asignando vehículos y palas. La finalidad es cumplir con objetivos impuestos de calidad y producción minimizando el número de camiones necesarios. Se plantean como restricciones la producción mínima que deberá tener una pala para justificar su uso y se considera que la flota de vehículos es heterogénea. Se utilizó un algoritmo que es un híbrido de dos métodos de búsqueda heurística, el GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures) y el GVNS (General Variable Neighborhood Search). Se encontró que los resultados del algoritmos fueron comparables con aquellos

obtenido por el optimizador comercial CPLEX.

La teoría de colas es utilizada nuevamente en [16]. En éste trabajo se utiliza para calcular el número óptimo de camiones ya que se considera el factor más importante de la operación minera. El tamaño de la flota se calcula teniendo en cuenta que lo que se desea es maximizar la productividad. El trabajo se concentra principalmente en crear un plan de producción y no en el despacho en tiempo real. Los resultados que se obtienen son además contrastados contra los obtenidos por un modelo de programación lineal clásico donde la función que se intenta minimizar es el número de camiones para cubrir todas las palas sin la necesidad de colas. Los métodos son aplicados sobre palas y puntos de descarga para desechos de acuerdo a datos de una mina real.

El autor de [17] establece que los métodos mas comunes que usan reglas heurísticas y programación matemática, realizan la asignación de recursos y la planificación del despacho en base a datos históricos y no a información actualizada. Además estas soluciones suelen utilizar métodos determinísticos mientras que el problema es estocástico. En base a esto se propone una nueva política de asignación de recursos que se obtiene mediante programación estocástica. Esto intenta mejorar la asignación inicial de camiones y luego adaptar el resultado de acuerdo al progreso de la operación minera. El autor considera que si bien la mezcla de minerales es importante en la visión global de la operación, esto se maneja con la tasa de producción de las palas por lo que el objetivo principal es el de mantener un flujo constante de material a los puntos de descarga con la menor cantidad de camiones posibles.

Mas recientemente el programa SmartMine™ fue utilizado para simular y obtener resultados de un método multietapa en [4]. La primer fase del método resuelve un sistema de programación lineal para encontrar la máxima capacidad de la mina y el tamaño óptimo de la flota necesaria. La segunda fase utiliza un algoritmo que genera un programa con la mejor asignación para lograr los objetivos establecidos por la primera fase. Esta asignación se obtiene realizando una simulación para predecir el desempeño de la mina.

Luego se toma la decisión de despacho utilizando optimización multiobjetivo previniendo que se optimice sólo un aspecto de la mina. El método se construyó tomando en cuenta las recomendaciones propuestas por [2] para un sistema de despacho ideal.

En [11] se presenta un modelo estocástico de despacho de camiones, y su producción asociada, para una mina a cielo abierto de tamaño mediano con solo un punto de descarga. El objetivo principal es el análisis y la comparación de políticas heurísticas de despacho a la vez que se busca una regla híbrida aplicable. Se implementa un simulador estocástico en el que se realizan experiencias comparando diversas metodologías incluyendo un método adaptativo propuesto. El trabajo concluye que el impacto de las diferentes reglas de despacho no afectan mayormente las medidas de desempeño elegidas: la producción en número de camiones que han descargado, utilización de los camiones y utilización de las palas. Tampoco se pudo encontrar una influencia notable al variar los tiempos de viaje de los camiones de carga o descarga. Los factores mas influyentes fueron el número de camiones, el número de palas y su distancia al lugar de descarga, junto con la disponibilidad de los camiones y palas.

1.2. Motivaciones y objetivos

Si bien existe una gran abundancia de trabajos estudiando los problemas de logística, de tráfico y distribución, lo mismo no es cierto para el caso particular de los camiones en una operación minera. Esta temática provee un caso de estudio interesante debido a sus restricciones inherentes, pero para cual no existe un marco formal de estudio. La revisión bibliográfica ha revelado una gran variedad de enfoques en el problema que si bien contienen ciertos matices en común, no son estrictamente comparables. Los resultados, cuando se exponen, se obtienen con metodologías distintas y los índices de desempeño que permiten definir el comportamiento global de la mina son variantes.

Además de lo expuesto, todas las soluciones planteadas en los trabajos revisados,

limitan el sistema de despacho simplemente a la selección de destinos o la asignación de recursos a palas, caminos o un objetivo de producción dado. La realidad es que se han creado nuevas posibilidades debido al progreso en los sistemas de comunicaciones así como los avances en las capacidades de computación.

El primer concepto que se explorará es la posibilidad fijarle a un camión cuanto tiempo deberá insumirle el viaje a un determinado destino, es decir establecer la velocidad objetivo a la cual debe viajar. Esto implica que en cada instancia en la que sea conveniente, se podrá ajustar la velocidad de un vehículo en tránsito para lograr minimizar tiempos de espera, consumir menos combustible y aumentar la productividad de la mina en general.

Estas decisiones se tomarán en base a información global instantánea de la mina, la cual tendrá en cuenta los destinos, posiciones y velocidades de todos los vehículos de la mina. En [18] se utilizó una metodología similar, que utiliza sólo información local, para intentar minimizar el efecto de accidentes en la productividad total. La información local utilizada es la posición y la velocidad de los vehículos en un entorno del camión bajo consideración.

Además se desarrollará una nueva política que se basa en la utilización de una secuencia de despacho fija. Esto permitirá modelar el flujo de vehículos en la mina y diseñar la secuencia para cumplir con múltiples objetivos. Una vez que el destino esté elegido para un camión dado, se utilizará el estado global instantáneo de la mina para definir la velocidad más conveniente para el vehículo. Los resultados que se hallen serán contrastados con métodos que se encuentran en la literatura.

Para poder lograr una buena comparación es necesario establecer un marco de referencia apropiado. Por este motivo, se tomó la decisión de implementar una nueva plataforma de simulación que permita la comparación de las distintas metodologías de despacho, así como formalizar los índices de desempeño que permiten evaluar la calidad de la operación. Al plantear la necesidad de realizar este simulador, surge inmediata-

mente el problema de modelar la dinámica de los camiones al moverse por los caminos inclinados de una mina. Para solucionar este problema de forma rápida y efectiva se implementó un modelo basado en ecuaciones físicas simples que requiere de poca cantidad de datos, es rápido para evaluar y permite representar el comportamiento del conductor con un solo parámetro intuitivo.

Por lo tanto las contribuciones de este trabajo se pueden resumir de la siguiente manera:

1. Se implementó un marco de comparación compuesto de tres componentes. El primero es un conjunto de índices de desempeño que cuantifican la eficiencia de la operación minera. El segundo componente es un conjunto de condiciones de borde que definen las reglas básicas del flujo de la flota de vehículos en una mina. El tercer componente es modelo simple que permite simular la dinámica de cada camión de carga viajando por los caminos de una mina a cielo abierto. El objetivo de este modelo es solamente proveer una forma de calcular las posiciones y velocidades de los vehículos. En consecuencia, el modelo utiliza sólo los parámetros mínimos indispensables y es rápido de evaluar. Fue necesario incluir la actitud del conductor por lo que se desarrollaron algoritmos que permitieran recrear los comportamientos mínimos indispensables para cumplir con los objetivos del simulador.
2. Se desarrolló una nueva metodología de despacho con un enfoque novedoso. Este enfoque se basa en el estudio de las propiedades de una secuencia de despacho fija la cual se crea de acuerdo dados los datos de la mina y el tamaño de la flota, para lograr maximizar la productividad o minimizar el tiempo de ocio de los nodos de carga y descarga.
3. Se propone un algoritmo que utiliza la información actualizada global de la operación para modificar dinámicamente la velocidad objetivo de todos los vehículos de la flota. Esto se hace con el objetivo de eliminar tiempos de espera y reducir el

consumo de combustible.

Es importante remarcar que los conceptos que se desarrollan podrán ser aplicados a diversos problemas de transporte, no quedando limitado solamente a una operación minera.

1.3. Estructura de la tesis

Esta tesis se estructuró de la siguiente manera:

- El Capítulo 2 presenta el entorno completo que permitirá la comparación de políticas. La primera parte realiza una descripción genérica del problema de despacho presentado la notación que se utilizará en las diversas secciones de éste trabajo. Esto incluye los índices de desempeño para una mina, las condiciones bajo las cuales se supone se mueve una flota de camiones y un modelo de movimiento creado a partir de ecuaciones físicas simples. Esto crea la necesidad de definir los comportamientos que son necesarios para que el simulador cumpla con los objetivos establecidos.
- El Capítulo 3 presenta el primer componente del sistema de despacho propuesto. Para esto se define el concepto de una secuencia de despacho y sus propiedades. En base a esto se crea un modelo que permite predecir la productividad que tendrá la mina así como los tiempos de ocio de los nodos. Esto da lugar al desarrollo de dos métodos que intentan maximizar el primero y minimizar el segundo. También se presentarán las políticas de despacho que se utilizarán para contrastar la eficacia del nuevo método.
- El Capítulo 4 desarrolla el segundo componente del método de despacho, el cual modifica de forma dinámica las velocidades objetivo de los camiones. Esta modificación se realiza en función de los destinos de los vehículos previamente despachados

y su ubicación. Esto permitirá lograr que los camiones viajen a la velocidad justa para que no se formen colas, disminuyendo el tiempo de espera y el consumo de combustible.

- El Capítulo 5 presentará los resultados. En primer lugar se mostrarán experiencias que demuestran la calidad del modelo de movimiento y los algoritmos de comportamiento. Luego se presentarán resultados de simular cuatro minas ejemplo distintas comparando los índices de desempeño establecidos entre todas las técnicas presentadas. Los resultados serán analizados en detalle para poder elaborar las conclusiones.
- El Capítulo 6 presenta las conclusiones del trabajo y propone líneas de investigación futura.

Capítulo 2

Entorno estándar de evaluación

2.1. Nociones básicas

En un problema de logística se debe manejar el flujo de recursos de un punto de origen a su punto destino con el objetivo de cumplir ciertos requerimientos con determinadas restricciones. Estas vendrán dadas por la naturaleza del problema o por cómo se deben cumplir los objetivos. Diversas industrias se enfrentan al problema de la asignación de vehículos en forma dinámica con el objetivo de mejorar algún índice de desempeño. En [2] se realiza una breve reseña de la naturaleza de estos problemas y la visión de diversos autores al respecto.

Para el caso particular de una mina, los puntos de carga son donde se realiza la extracción del material, generalmente mediante palas mecánicas, que cargan a los camiones de transporte. Los puntos de descarga son lugares de procesamiento (como chancadores) o de almacenamiento. El sistema de transporte cuenta con una flota N de vehículos que transportará material entre los dos conjuntos de puntos especificados. Los caminos, si bien pueden ser diversos, son predeterminados, como por ejemplo un camino de tierra. Por lo tanto, surge naturalmente representar esta situación con un grafo. En general, los nodos de un grafo representarán ubicaciones de interés en las cuales los vehículos

deberán reducir su velocidad substancialmente. Estos podrán ser curvas muy cerradas, estacionamientos, puntos de carga y descarga, lugares de mantenimiento, etc. Los arcos del grafo serán caminos en los cuales los vehículos podrán viajar para moverse entre los puntos de interés definidos. En general, un arco será unidireccional por lo que tiene un nodo de comienzo y uno de fin. Para representar un camino de doble sentido entre dos nodos se deberán utilizar dos arcos separados. En estos casos, la representación gráfica, se simplifica utilizando arcos bidireccionales.

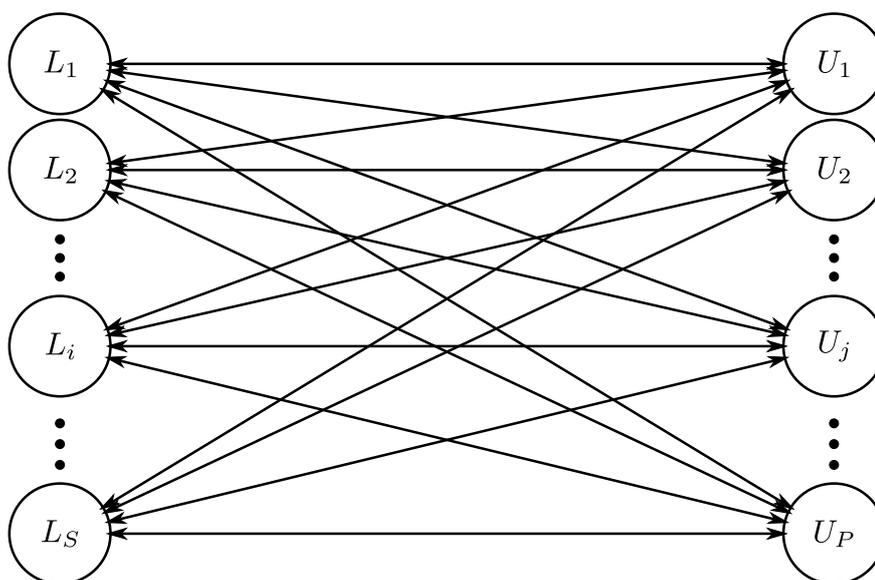


Figura 2.1: Generalización del grafo que representa un problema de transporte. Una flota de vehículos se moverá constantemente entre dos conjuntos de nodos: S puntos de carga y P puntos de descarga.

El grafo representado en la Figura 2.1 es genérico y es una abstracción que permite ver un solo vínculo (camino) desde cada uno de los nodos en un conjunto origen (carga o descarga), a cada uno de los nodos del conjunto destino (descarga o carga, respectivamente). Una vez que un vehículo llega a su destino deberá realizar alguna tarea, que en el caso de un sistema de transporte será la carga o descarga de material.

En forma genérica, el grafo de la mina tendrá G nodos y A arcos. Los nodos y arcos serán nombrados utilizando una numeración secuencial, es decir que sus nombres

serán números naturales. Los vehículos de transporte también serán identificados con un número único que es asignado entre 0 y $N - 1$. A continuación se presentan una serie de conceptos básicos y de notaciones que se utilizarán a lo largo de el resto de este trabajo.

Definición 2.1. . Un *arco* w está caracterizado por su distancia d_w y su pendiente s_w . La pendiente es una propiedad del camino que en la industria minera suele representarse como un porcentaje, indicando el número de metros de elevación por cada 100 metros que se avanza en forma horizontal. El ángulo de inclinación del arco estará dado por $\theta_w = \arctan(\frac{s_w}{100})$. Además, se define como *camino* a la secuencia de arcos (o nodos) entre un punto de descarga (carga) y un punto de carga (descarga).

Definición 2.2. Un *nodo destino* es un nodo que se encuentra en el comienzo o fin de un camino. En una mina dada, existen S puntos de carga los cuales forman el conjunto $\mathbf{L} = \{L_i, 1 \leq i \leq S\}$ y P puntos de descarga que forman el conjunto $\mathbf{U} = \{U_j, 1 \leq j \leq P\}$. El conjunto de nodos destinos es denominado $\mathbf{Z} = \mathbf{L} \cup \mathbf{U}$.

Definición 2.3. El tiempo necesario, en segundos, para realizar un determinada tarea (cargar o descargar) en un nodo $z \in \mathbf{Z}$ se denomina *tiempo de servicio* y es una propiedad del nodo que se nota $t_{se}(z)$. Para nombrar específicamente el tiempo de servicio de un nodo $L_i \in \mathbf{L}$ se utilizará la notación t_{s_i} y a su vez para nombrar específicamente el tiempo de servicio de un nodo $U_j \in \mathbf{U}$ se utilizará la notación t_{p_j} . Si una cola existe en el nodo z el tiempo necesario para que termine su tarea el último camión de la cola se notará $E_{wt}(z)$.

Definición 2.4. Sea h uno de un conjunto de camiones que se dirigen a un nodo destino $z \in \mathbf{Z}$. Si estos camiones se ordenan en una lista por orden de llegada, del primero al último, se dirá que h *llegará en la posición* k ($k \geq 0$) entre todos los vehículos que van hacia el mismo destino y esto se notará $z_k = h$. Esto implica que k camiones llegarán a z antes que h .

Definición 2.5. Sea h un camión que viaja por determinado arco de la mina, se denominará f_h al *vehículo que viaja inmediatamente delante en el mismo arco que h* . Si h no tiene un vehículo enfrente entonces $f_h = -1$.

Definición 2.6. Sea h un camión viajando por el arco w con destino final el nodo $z \in \mathbf{Z}$. Entonces se notará $d_z(h)$ a la *distancia restante para que h llegue a su destino* mientras que $d_w(h)$ representa la *distancia restante para llegar al final del arco w* .

Definición 2.7. Se define como *velocidad objetivo* o de *velocidad de crucero* a la velocidad que tratará de alcanzar y mantener un camión cuando se está trasladando de un nodo destino a otro. Esta velocidad se notará como v_c , y puede actualizarse en cualquier momento del trayecto.

La Figura 2.1 muestra los vínculos entre los nodos del conjunto \mathbf{L} y los del conjunto \mathbf{U} . En general el camino entre dos puntos pertenecientes de cada uno de los conjuntos \mathbf{L} y \mathbf{U} poseen varios nodos. Sin embargo, para el desarrollo de las técnicas de despacho en el Capítulo 3, se abstraerán estos caminos como un sólo arco de una distancia igual a la de la suma de todos los arcos. Esta simplificación desprecia la variedad de caminos que pueden existir para llegar de un destino a otro, suponiendo que generalmente no existen alternativas. Esta es representativo de la situación en una mina de cielo abierto. En este tipo de grafos se tiene que $G = S + P$ y $A = 2SP$, considerando que un vínculo entre dos nodos son dos caminos, uno de ida y otro devuelta. Para la simulación o las técnicas desarrolladas en el Capítulo 4 este nivel de abstracción no es necesario y por ende se podrá considerar cualquier topología de grafo.

Uno de los principales aportes de este trabajo será la definición de un entorno estándar para comparar el desempeño de distintas políticas y los costos asociados al funcionamiento de la mina. Este entorno comprende los siguientes componentes:

- La definición de un conjunto de valores que permita cuantificar la calidad o eficiencia de una operación minera.

- Pautas para la simulación de un flujo de vehículos en una mina.
- Un modelo de movimiento simple que permita obtener la información indispensable para calcular el conjunto de valores del primer punto y que esté restringido a las consignas del segundo.

La implementación de estos tres componentes dará lugar a un simulador con el cual se podrán observar los efectos de distintas políticas de despacho. La posición de los camiones se actualizará en incrementos temporales para dar una mayor precisión y flexibilidad al programa en general.

Definición 2.8. Se denomina *paso temporal* o *intervalo de simulación* a la mínima cantidad de tiempo que debe pasar para actualizar todas las variables que representen completamente la situación de la mina. Este tiempo se nota Δt . Las variables físicas que representen a cada camión se actualizarán en intervalos de esta magnitud, así como los tiempos de servicio.

Definición 2.9. El *intervalo de tiempo en el cual se estudia una operación minera* o, lo que es lo mismo, la duración de una simulación se nota como T_{ST} .

En las próximas secciones se expandirá sobre cada uno de los tres componentes presentados.

2.2. Índices de desempeño

A los valores que permiten cuantificar la eficiencia de la mina, se los denomina *índices de desempeño*.

Está claro que a grandes rasgos los objetivos de un sistema de despacho son el aumento de la productividad y la disminución de los costos operativos [2] [4]. El producto de la minería es el mineral que es extraído de toda la roca que es excavada. En general,

esto es directamente proporcional a la cantidad de camiones que han volcado su carga de mineral, ya sea en depósitos o en chancadores.

Definición 2.10. Se define como *productividad* y se nota Pr a la suma del número de camiones que fueron atendidos en los P puntos de descarga en un determinado intervalo de tiempo, por lo que se mide en número de visitas totales. Se considera que todos los nodos de descarga son de igual importancia.

Otro factor fundamental es el tiempo de ocio del equipamiento. Dado que tanto las palas, chancadores y vehículos de transporte son costosos de adquirir y mantener, una de las principales formas de reducción de costos es garantizar su mayor utilización. Para ello se necesita de técnicas que permitan reducir los tiempos de espera de los camiones en las colas y el tiempo acumulado total sin que los equipos de carga y procesamiento tengan vehículos para atender.

Definición 2.11. Se denomina *tiempo total de espera de camiones* o I_{wt} la suma de todo el tiempo que cada uno de los camiones de la flota permaneció sin moverse, a la espera de un evento, durante el período de simulación. Esto incluye los momentos de espera en colas y, de existir, el tiempo de espera para el cruce en nodos intermedios. Este valor es medido en horas.

Definición 2.12. Se denomina *tiempo acumulado de ocio de los nodos* o I_{tc} a la suma de los tiempos que cada nodo de servicio permaneció sin tener un vehículo el cual atender, y también es medido en horas.

Uno de los factores más influyentes en el costo de operación de los camiones de carga es el consumo de combustible. En general los modelos de consumo de combustible pueden llegar a ser muy complejos, dependiendo del número de parámetros que se tengan en cuenta. Sin embargo, el objetivo en este trabajo es obtener un contraste entre técnicas de despacho y no una mayor precisión en la correlación entre los resultados simulados y

datos reales. Por tal motivo se utiliza un modelo de consumo presentado en [19], el cual es simple y requiere pocas variables físicas. El consumo se calcula como,

$$\Delta C_o = \begin{cases} (\beta_0 + \beta_1 F_0 v + \beta_2 M v a^2) \Delta t & \text{si } F_0 > 0 \text{ y } a > 0 \\ (\beta_0 + \beta_1 F_0 v) \Delta t & \text{si } F_0 > 0 \text{ y } a \leq 0 \\ \beta_0 \Delta t & \text{si } F_0 \leq 0 \text{ y } a \leq 0, \end{cases} \quad (2.1)$$

donde

- β_0 (ml/s) es el consumo constante cuando el vehículo está en reposo
- β_1 (ml/kJ) es el parámetro de eficiencia que relaciona el combustible consumido a la energía que provee el motor. Es decir, el combustible consumido por cada unidad de energía generada.
- β_2 (ml/(kJ.m/s²)) es el parámetro de eficiencia que relaciona el combustible consumido durante una aceleración positiva al producto de la energía de la inercia y la aceleración. Es decir el consumo por unidad de energía-aceleración.
- Las variables son, la aceleración el vehículo a (en m/s²), su velocidad v (en m/s), la fuerza de neta del motor F_0 (en Newtons) y la masa (en Kg).

La Ecuación (2.1) permite calcular los mililitros de combustible consumidos en cada paso temporal (Δt). Las variables físicas necesarias son F_0 , M , v y a las cuales dependerán del modelo de movimiento. Los parámetros β_0 , β_1 y β_2 fueron ajustados manualmente y son parámetros de simulación.

El consumo de combustible por si solo, como índice de desempeño, provee información incompleta. Por ejemplo, se puede dar el caso donde una política de despacho A obtuvo un menor consumo de combustible que una política B. Pero esta reducción vino a costa de una caída pronunciada de la productividad. Por lo que en realidad la política A se podrá considerar mejor que la B, sólo si el ahorro en combustible es superior a la perdida

de productividad percibida con respecto a la política B. Se considera una comparación mas justa, entonces, si los valores contrastados son el gasto de combustible necesario para tener una unidad de productividad, es decir para que un vehículo entregue su carga.

Definición 2.13. Sea el consumo total de combustible, para una política dada en una ventana de tiempo fija, igual a C_o con una productividad P_r entonces el *combustible por camión* o C_pM se define como:

$$C_pM = \frac{C_o}{P_r}. \quad (2.2)$$

El C_pM provee una idea de cuanto costó, en litros de combustible, cada camión que visitó un nodo de descarga.

En resumen se podrá decir que una política tiene mejor desempeño mientras,

- mayor sea su productividad P_r ,
- menor sea su I_{wt} ,
- menor sea su I_{tc} y
- menor sea su C_pM .

A pesar de que se utilizan técnicas de despacho de referencia para comparar la efectividad de los métodos propuestos, su desempeño en cada uno de lo índices definidos es variante de ejemplo a ejemplo. Por lo que utilizar una sola técnica de base no producirá las comparaciones más justas. Por lo tanto, para ver las ventajas o desventajas de utilizar una política determinada en una mina con un tamaño de flota fijo, es necesario ver el cambio que se logra con respecto a todas las demás técnicas. Lo más práctico para lograr esto es establecer como referencia de productividad a la política que haya logrado el menor valor. Para el caso de los otros tres índices lo mejor es establecer como referencia las políticas que hayan generado los valores más altos.

Definición 2.14. Dado un conjunto de valores positivos \mathbf{C} , se denominará *aumento porcentual relativo* de $a \in C$ y se notará $\text{APR}(a)$ al porcentaje en el cual a es mayor que el mínimo valor de \mathbf{C} . Es decir que $\text{APR}(a) = \frac{a - \min\{C\}}{\min\{C\}}$. De forma similar, se denominará *reducción porcentual relativa* de $a \in C$ y se notará $\text{RPR}(a)$ al porcentaje en el cual a es menor que el máximo valor de \mathbf{C} . Es decir que $\text{RPR}(a) = \frac{\max\{C\} - a}{\max\{C\}}$.

De la Definición 2.14, surge que las técnicas que sean utilizadas como referencia siempre tendrán un valor de APR y RPR nulo, mientras que las demás tendrán un valor no negativo.

2.3. Pautas de una operación minera.

Los modelos de movimiento deberán tener en cuenta las particularidades de como es el flujo de camiones en una mina. Una de las primeras restricciones que se presentan es que los camiones tiene estrictamente prohibido pasarse entre si [20], lo cual implica que un conjunto de camiones moviéndose en un arco en la misma dirección tendrán un comportamiento de caravana. El primer camión de la caravana no se verá afectado por este hecho, pero el segundo deberá adaptarse a los cambios de velocidad del primer camión, el tercero a los del segundo y así sucesivamente. Esta noción es fundamental para el desarrollo de todos los modelos, para la estructura del simulador y para los algoritmos de control de selección de destino y velocidad propuestos.

Cuando un vehículo llega a su nodo destino, en el caso de no haber camiones que hallan llegado antes, podrá ser atendido inmediatamente. De lo contrario el vehículo deberá esperar que todos los camiones que hallan llegado previamente realicen sus tareas en ese nodo. Esta dinámica es la misma que la de una caravana salvo que el primer camión no se mueve hasta que halla finalizado su tarea. Se supone que las colas de camiones no ocupan espacio en el arco del grafo, sino que la mismas se forman aparte. Esta suposición simplifica varios aspectos del trabajo, ya que sin importar la longitud

de la cola en un destino, un camión que será agregado a la misma tendrá que recorrer la distancia completa del arco entrante al nodo y se agregará a la cola sin ocupar lugar en el arco que terminó de recorrer.

Cuando un nuevo camión se agrega a una cola, la posición del mismo se fija sumando, a la posición del último camión en la cola, una distancia de seguridad. Esto hace que un camión que se encuentra seguido en las últimas posiciones de largas colas, acumule mucho tiempo improductivo y recorra mas distancia que la que debería. Las latencias de los tiempos de espera son uno de los principales problemas a resolver, ya que contribuyen a la caída de la productividad y aumentan los costos al tener a los camiones detenidos y con el motor en funcionamiento.

Dado este comportamiento de caravana, es posible categorizar a todo camión en la simulación de dos formas.

Definición 2.15. Un camión que no tiene otros vehículos por delante, ya sea en una cola en un nodo destino o al transitar un arco de la mina, es denominado *camión líder*. Su movimiento estará fijado sólo por las intenciones del conductor y únicamente limitado por las capacidades del vehículo que maneja.

Definición 2.16. Un vehículo que no es líder se denominará *camión seguidor* y su comportamiento está jerarquizado de forma que su objetivo principal es no colisionar con el vehículo que tengan en frente. Si no existe peligro de que esto suceda, se moverán como si fuera líder.

Estos dos comportamientos dependerán de la forma general en la que se deberá mover un camión líder. Dados los índices de desempeño, es claro que el simulador deberá poder calcular los tiempos de viajes de cada uno de los vehículos. En principio, la forma mas simple de hacer esto es calcular el tiempo de recorrido de un arco w (t_w) como,

$$t_w = \frac{d_w}{v_c}, \quad (2.3)$$

donde v_c es la velocidad crucero y d_w es la distancia del arco. La suma de todos tiempos de recorrido de los arcos que conectan dos destinos será el tiempo de viaje para un vehículo. La velocidad objetivo, puede ser impuesta por una estrategia de despacho o por el conductor. Utilizando esta expresión, el comportamiento de caravana es fácilmente reproducible, ya que basta con igualar la velocidad de un camión seguidor a la del vehículo que tiene enfrente en caso de que este se esté moviendo mas lentamente y la diferencia de posición sea lo suficientemente pequeña. El cambio de velocidad será instantáneo.

Calcular los tiempos de esta forma no permite evaluar el consumo de combustible, ya que el modelo no involucra la masa del vehículo, la fuerza que realiza el motor o la aceleración. Por lo tanto es un modelo incompleto para las objetivos establecidos. Para contemplar estas variables y parámetros es necesario simular la aceleración y frenado de un vehículo líder.

Si los nodos del grafo son puntos en los cuales los camiones deben ir lentamente, se puede realizar una simplificación y establecer que la velocidad en estos puntos será nula. Esto permite definir la curva de velocidad deseada para un camión líder que atraviesa un arco de nodo a nodo, como se ve en la Figura 2.2.

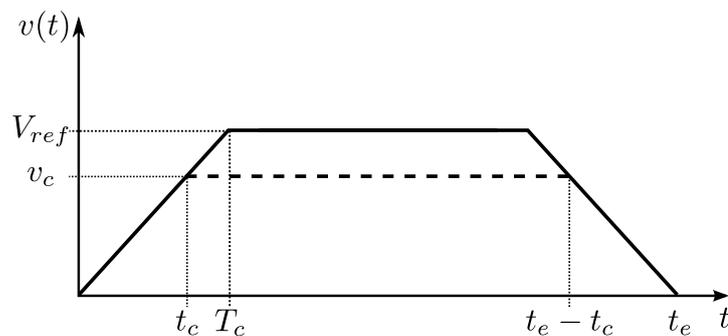


Figura 2.2: Velocidad en función del tiempo para un camión a lo largo de un camino entre dos nodos. El camión partirá de $t = 0$ acelerando de forma constante (el valor dependerá del conductor, representado por T_c) hasta llegar a una velocidad objetivo v_c . Luego mantendrá esa velocidad hasta que juzgue que deberá frenar (utilizando la misma pendiente de cambio de velocidad, pero de signo opuesto) para llegar al fin del camino en t_e con velocidad igual a cero.

La curva de velocidad de la Figura 2.2 es una primera aproximación al comportamiento deseado. Lo importante es que se alcance la velocidad objetivo v_c en el tiempo t_c . El valor de t_c dependerá del conductor que es modelado con el tiempo T_c . Se entrará en mas detalle acerca de estos valores en la Sección 2.4.2.1

En general, el comportamiento de un camión seguidor deberá ser igual al de un camión líder, siempre que la distancia entre los dos sea prudente. Para prevenir colisiones es necesario diseñar el comportamiento de un vehículo seguidor para que ajuste su velocidad de forma adecuada.

La idea de las pautas que se están proponiendo es generar las condiciones necesarias para que se puedan calcular los índices de desempeño logrados por una técnica de despacho cuando la mina funciona bajo condiciones normales. Esto implica que, por el momento, no se consideran ningún tipo de eventos que interrumpen el comportamiento normal de la mina tales como parada de mantenimiento o accidentes. Por lo cual el flujo de vehículos, durante el período de simulación, será constante entre el grupo de nodos de carga y descarga.

En la vida real, es posible que un conductor humano no acate las sugerencias del sistema de despacho y se dirija al destino que le parezca más conveniente. Sin embargo, para comparar las técnicas de selección de destinos, esta capacidad no está contemplada en el entorno de simulación y se establece que las órdenes de los sistemas de despacho activos serán obedecidas siempre.

A modo de resumen, a continuación se listan las cuatro pautas fundamentales que establecen las condiciones bajo las cuales se harán las simulaciones del entorno estándar.

- Un vehículo de carga no puede pasar a otro. Si un vehículo tiene uno delante deberá modificar su comportamiento, de ser necesario, para mantener una distancia prudencial con el mismo. Además, se formarán colas en los nodos destinos en las cuales un vehículo sólo será atendido cuando el camión delante de él termine con su tarea.

- La velocidad de un vehículo en los nodos de una mina es cero. Un vehículo líder partirá de velocidad cero en un nodo origen, llegará a una velocidad objetivo y mantendrá la misma hasta llegar cerca del final del arco. A continuación, el vehículo desacelerará de forma similar con la cual aceleró para llegar a velocidad cero al nodo al final del arco.
- La flota de vehículos se mueve sin cesar entre los conjuntos de nodos de carga y descarga. Accidentes, paradas por mantenimiento, u otras situaciones que irrumpen el flujo del transporte no están contempladas.
- Los vehículos siempre obedecen las órdenes del sistema de despacho activo.

2.4. Modelo de movimiento y algoritmos de comportamiento

En esta sección se trabajará sobre la tercer parte del entorno estándar que es la representación del movimiento de los camiones. En la Sección 2.2, se estableció un modelo simple del consumo de combustible. El modelo depende de cinco magnitudes, la fuerza que realiza el vehículo, su aceleración, su velocidad, su masa, y el tiempo durante el cual las otras variables se mantienen constantes. El paso temporal será un parámetro de simulación, pero las otras cuatro magnitudes deben calcularse.

La curva de la Figura 2.2 se consideró como la mas simple posible que permite estimar la magnitudes deseadas. Además es un aproximación intuitiva del comportamiento de un vehículo en un arco. Esta curva define dos comportamientos bien distinguibles, el primero es llegar a una velocidad objetivo y mantenerla constante y el segundo es frenar de tal forma de llegar con velocidad cero al fin del arco. Si el vehículo es seguidor, existirá un tercer comportamiento que es la regulación de velocidad para evitar las colisiones.

El comportamiento general de los vehículos se puede separar en dos grandes partes: el modelo de movimiento, el cual es un conjunto de ecuaciones que actualiza la posición, velocidad, aceleración y fuerza de cada camión en cada paso temporal; y los algoritmos que controlan a el vehículo para lograr los tres comportamientos necesarios. A modo de resumen estos son:

- Determinar como acelerar hasta un velocidad objetivo. Este comportamiento lo utilizan los camiones líderes y seguidores.
- Frenar de tal forma de llegar con velocidad nula al fin de un camino. Solo es utilizado por un camión líder.
- Frenar para regular la velocidad y evitar colisiones. Solo es utilizado por un camión seguidor.

El modelo de movimiento debe contemplar la inclusión de los límites, en cuanto a capacidad de potencia y fuerza, del vehículo. Además el modelado de la magnitud con la que el conductor desea acelerar y frenar deberá ser lo mas simple posible. La razón por la que esto es importante es por que se busca que las actualizaciones de las variables físicas se logren resolver a través de la evaluación directa de ciertas expresiones. De esta forma se evita usar algoritmos de métodos numéricos e iterativos en la simulación del movimiento. Esto permitió ganar gran rapidez en la simulación.

Los algoritmos de comportamiento requieren calcular una magnitud en particular, denominada pendiente de fuerza, a partir de las ecuaciones de movimiento del modelo. Se hizo gran esfuerzo para que esta magnitud se pudiera calcular de forma directa con la evaluación de algunos condicionales y una expresión, sin la necesidad de algoritmos numéricos complejos. Esto llevó a que el simulador final permita obtener los resultados de forma rápida, ya que la simulación de la física completa del vehículo se reduce a un pequeño conjunto de cuentas.

El simulador debió ser rápido por que se utilizaría como herramienta de análisis y medición para el desarrollo de las técnicas de despacho y ajuste de velocidad. Por lo tanto fue muy común el uso de múltiples simulaciones consecutivas, buscando distintos datos y probando variedad de parámetros. Un simulador más completo hubiese alargado significativamente el tiempo de desarrollo de las metodologías de despacho y velocidad, las cuales eran el principal objetivo del trabajo. El simulador, como marco de referencia fue creado como herramienta de medición. Por lo tanto, el simulador sólo fue creado con la complejidad suficiente para permitir la comparación efectiva de técnicas y proveer los datos necesario para el análisis.

A continuación se desarrollará el modelo de movimiento el cual está compuesto por tres reglas básicas y en la sección que sigue se desarrollarán los algoritmos comportamiento necesarios.

2.4.1. Modelo de movimiento de un vehículo.

El movimiento de un vehículo surgirá a partir de una aceleración que represente las intenciones del conductor o las limitaciones del vehículo. Las simulaciones avanzan en pasos temporales predefinidos y constantes. Esto implica que para actualizar las variables físicas de un vehículo se deberá calcular la fuerza y aceleración y con ellas las diferencias de posición y velocidad con respecto al fin del paso temporal anterior.

La posición del vehículo se tomará siempre con respecto al comienzo del arco en el que se encuentra. Se reiniciará a cero cada vez que el camión pase por un nodo y se irá incrementando hasta que esta coincida con la distancia del arco que recorre.

Definición 2.17. Las magnitudes de velocidad, posición y fuerza con las cuales comienza el cálculo en un paso temporal se conocen como *condiciones iniciales* y se notarán con un subíndice cero, $(v_0, p_0$ y $F_0)$.

Se asumirá que a un vehículo no le es posible ir marcha atrás. Esto implica que en

ningún momento la velocidad podrá ser negativa o se podrá reducir su posición en el arco.

Cada vehículo podrá ir cargado o descargado. Por lo que su masa es variable. Para simplificar la implementación del modelo, se supondrá que el vehículo siempre está cargado a su máxima capacidad. Por lo que sólo tendrá dos masas posibles, M_l cuando esté cargado y M_u cuando no sea así.

Un modelo incremental de movimiento con relativamente pocos parámetros fue suficiente para cumplir los requerimientos del modelo. Por este motivo se eligió representar a un camión moviéndose en un camino inclinado con un modelo de bloque rampa. Éste se ve en la Figura 2.3.

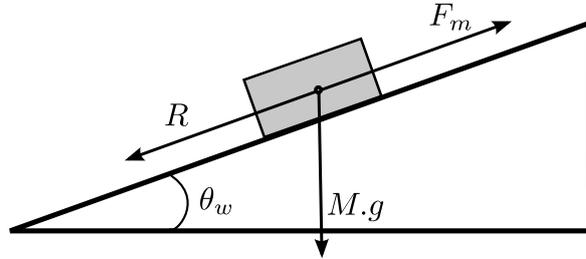


Figura 2.3: Sistema de un bloque en una rampa sin rozamiento. Esta es una representación de un camión que se traslada por un camino empinado. Se utilizó como punto de partida para desarrollar las ecuaciones que permiten actualizar la posición y velocidad de los vehículos en el simulador.

En la figura, F_m es la fuerza del motor que empujará al camión para que avance, o cambiará de signo para frenarlo. La oposición al movimiento del camión, R , debida a la acción gravitatoria en una subida, estará dada por la proyección del peso del camión sobre la dirección del movimiento. Es decir,

$$R = Mg \sin(\theta_w) \quad (2.4)$$

donde M es la masa del camión (que será igual a M_l o M_u , dependiendo de su estado de carga), g es la constante de aceleración de la gravedad y θ_w es el ángulo que forma el

camino por el cual viaja el camión con respecto a la horizontal, correspondiente al arco w . La aceleración del camión resulta en

$$a = \frac{F_m - R}{M}, \quad (2.5)$$

por lo que el cambio de velocidad y posición del vehículo depende de F_m .

Las empresas que fabrican los camiones para las operaciones mineras proveen hojas de datos que contienen información sobre las limitaciones y capacidades de los vehículos en la forma de gráficos de desempeño. Estos gráficos son de formato similar al que se ve en la Figura 2.4.

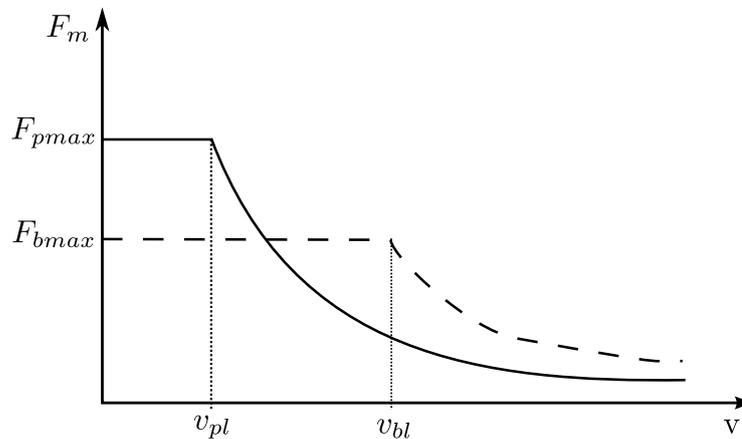


Figura 2.4: Gráfico de desempeño típico para un camión de minería, el cual muestra la fuerza que es capaz de hacer el motor en función de la velocidad. Las curvas que contiene son de potencia constante ($P = F_m v$), una para la aceleración (sólida) y otra para el frenado (punteada). También se muestra la fuerza máxima que es capaz de hacer el camión para acelerar o frenar, independientemente de la velocidad.

Las curvas de desempeño ponen un límite a la fuerza que el camión es capaz de generar en función de su velocidad. La Figura 2.4 presenta dos curvas, una para aceleraciones (trazo sólido) y otra que indica los límites en la capacidad de frenado (trazo no continuo). La *potencia de propulsión* (P_p) y la *potencia de freno* (P_b) también suelen ser datos provistos por los fabricantes. Por lo tanto, los gráficos de desempeño son curvas de potencia constante donde, $P_p = F_m \cdot v$ si la fuerza del camión se realiza en la dirección

del movimiento ($F_m \geq 0$) y $P_b = |F_m|.v$ cuando la fuerza es realizada en oposición a la dirección de movimiento ($F_m < 0$). A medida que la velocidad del vehículo es menor, la fuerza máxima que es capaz de hacer es mayor. Por debajo de una determinada *velocidad límite* (v_{pl} en el caso de la curva de propulsión y v_{bl} en el caso de la curva de frenado), la fuerza máxima queda en un valor determinado y no se sigue incrementando. Estos valores se ven en la curvas como F_{pmax} que es la *fuerza máxima de propulsión* y F_{bmax} que es la *fuerza máxima de frenado*.

Si bien con estos datos es posible deducir las capacidades del camión, aún es necesario definir como lo manejará el conductor, ya que normalmente el vehículo no funciona en su límite de forma constante. En el modelo que se implementó se supuso que el conductor afecta directamente la fuerza del motor de forma lineal. Por lo tanto el modelo de movimiento se puede separar en tres reglas básicas dependiendo del tipo de fuerza que se utilice.

1. La fuerza es constante. Esta se utiliza cuando la velocidad del vehículo es menos que v_{pl} (o v_{bl}) y la fuerza que debe hacer lo hace trabajar en el límite de sus capacidades, es decir F_{pmax} o F_{bmax} .
2. La fuerza está dada por la potencia dividido su velocidad. En este caso el camión también trabaja al límite pero su velocidad es superior a v_{pl} (o v_{bl}).
3. La fuerza cambia de forma lineal con el tiempo, con una dada pendiente, de acuerdo a los deseos del conductor.

La relación entre la fuerza necesaria (determinada por la carga y la pendiente del camino) en relación a la velocidad definirá cual de las tres reglas se debe utilizar para actualizar las variables físicas. Las Secciones 2.4.1.1, 2.4.1.2 y 2.4.1.3, presentan las expresiones y particularidades de cada una de estas reglas.

2.4.1.1. Regla 1: Fuerza constante

Esta regla de movimiento se desprende de la fuerza máxima absoluta de la que es capaz un camión. Las Ecuaciones (2.6), (2.7) y (2.8) representan la aceleración, cambio de velocidad e incremento de posición, respectivamente.

$$a = \frac{F_{max} - R}{M} \quad (2.6)$$

$$\Delta v = a\Delta t \quad (2.7)$$

$$\Delta p = \frac{a\Delta t^2}{2} + v_0\Delta t \quad (2.8)$$

Si las intenciones del conductor son las de acelerar, entonces $F_{max} = F_{pmax}$ en la Ecuación (2.6). Si la intención es la de frenar entonces $F_{max} = -F_{bmax}$. La Regla 1 deberá ser utilizada cuando:

- el conductor, al acelerar, intenta imponer una fuerza superior a la permitida por la curva de potencia, $F_m > \frac{P_p}{v_0}$ y la velocidad del vehículo es menor que la límite, es decir, $v_0 < v_{pl}$.
- el conductor, al frenar, intenta imponer una fuerza superior a la permitida por la curva de potencia, $|F_m| > \frac{P_b}{v_0}$ y la velocidad del vehículo es menor que la límite, es decir, $v_0 < v_{bl}$.

2.4.1.2. Regla 2: Potencia constante

Es posible que un conductor intente superar la fuerza que es capaz de hacer el camión a velocidades mayores que las límites, por lo cual en ese caso las curvas de potencia constante serán las limitantes. En esta situación $F_m = P/v$, donde $P = P_p$, si la intención es la de ganar velocidad y $P = -P_b$ si la intención es la de frenar. El signo es negativo en este último caso es por que F_m se deberá oponer a la dirección del movimiento. Por

lo tanto la Ecuación (2.5) tendrá la forma de,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{P - Rv}{Mv}. \quad (2.9)$$

Al integrar para resolver la Ecuación (2.9) se obtiene la siguiente expresión para Δt ,

$$\Delta t = -\frac{MP}{R} \ln \left(\frac{Rv - P}{Rv_0 - P} \right) - \frac{M}{R}(v - v_0). \quad (2.10)$$

Desafortunadamente, no es posible encontrar una solución para v en función de Δt , ya que Ecuación (2.10) es trascendental. Como fue establecido se desea poder realizar evaluaciones directas de expresiones en la actualización de la posición y velocidad por lo que utilizar un método numérico para despejar la magnitud de la velocidad no es factible. En este caso se hará una aproximación, suponiendo que el paso temporal es lo suficientemente pequeño, y por lo tanto la velocidad no cambiará demasiado durante el mismo. Es decir que se puede tomar como que $v = v_0$ durante Δt . Así la aceleración en Δt se puede tomar como constante e igual a

$$a = \frac{P - Rv_0}{Mv_0}. \quad (2.11)$$

La validez de esta aproximación dependerá de la longitud del intervalo Δt . Sin embargo, para obtener resultados válidos en la simulación es necesario utilizar valores pequeños de Δt , por lo cual el error de la aproximación será despreciable. Las ecuaciones de cambio de velocidad y posición serán idénticas a las de la regla 1, donde la aceleración tendrá la forma de la Ecuación (2.11).

Un detalle importante a tener en cuenta es que la Ecuación (2.10) no es válida para $R = 0$ (camino con pendiente despreciable). En este caso es posible hallar las expresiones para la aceleración, velocidad y cambio de posición de forma exacta cuya forma es,

$$a = \frac{P}{M\sqrt{\frac{2P}{M}\Delta t + v_0^2}}, \quad (2.12)$$

$$v = \sqrt{\frac{2P}{M}\Delta t + v_0^2}, \quad (2.13)$$

$$\Delta p = \frac{M}{3P} \left(\left(\sqrt{\frac{2P}{M}\Delta t + v_0^2} \right)^3 - v_0^3 \right). \quad (2.14)$$

2.4.1.3. Regla 3: Fuerza lineal

Las reglas de movimiento 1 y 2 no proveen ningún grado de control. Es decir, el conductor está limitado a decidir solamente si frena o acelera. Por lo tanto, la tercer regla de movimiento es la que le permite al conductor verdaderamente controlar el camión. La regla supone que el conductor variará la fuerza que realiza el motor, F_m , linealmente. Es decir,

$$F_m = F_0 + m\Delta t, \quad (2.15)$$

donde F_0 será la fuerza al comienzo del paso temporal Δt .

Definición 2.18. La *pendiente de fuerza* m dará la velocidad con la que cambia, durante un paso temporal, la fuerza que está ejerciendo el camión. Se considera que es una expresión directa de las acciones del conductor y su unidades son N/s.

Dada la Ecuación (2.15), la solución de las integrales para el cambio de posición y velocidad es trivial y las expresiones finales son,

$$a = \frac{F_0 + m\Delta t - R}{M}, \quad (2.16)$$

$$\Delta v = \frac{(F_0 - R)\Delta t}{M} + \frac{m\Delta t^2}{2M} \quad (2.17)$$

$$\Delta p = \frac{m\Delta t^3}{6M} + \frac{(F_0 - R)\Delta t^2}{2M} + v_0\Delta t \quad (2.18)$$

Para simplificar las expresiones, se introduce una nueva variable denominada *fuerza efectiva* $F_e = F_0 - R$ que indica si el camión está efectivamente ganando o perdiendo velocidad al comienzo de un paso temporal. Las condiciones para velocidad constante de un vehículo son $F_e = 0$ y $m = 0$.

2.4.2. Algoritmos de comportamiento de un conductor

En la regla de movimiento 3, las intenciones del conductor se ven reflejadas en el signo y magnitud que tenga la pendiente de fuerza. A continuación se muestra como se logra cada uno de los tres comportamientos básicos presentados en la Sección 2.4 en base al cálculo de la pendiente fuerza con determinadas condiciones de borde.

2.4.2.1. Llegar a la velocidad objetivo y mantenerla

Este comportamiento será necesario para camiones líderes y seguidores. De acuerdo a la Figura 2.2, un camión comienza a acelerar en $t = 0$, toma una velocidad constante v_c en $t = t_c$ y luego comienza a frenar en $t = t_e - t_c$ para llegar al fin del camino en $t = t_e$. El objetivo del algoritmo de esta sección es lograr la primer parte del comportamiento, es decir llegar a una velocidad determinada y mantenerla, lo que se muestra en la curva entre $t = 0$ y $t = t_e - t_c$. Se supone que la magnitud de la aceleración será la misma que la de desaceleración, ya que de esta forma basta con calcular una sola pendiente de fuerza para describir el comportamiento del vehículo.

Definición 2.19. Se define como *velocidad de referencia* (V_{ref}) la máxima velocidad permitida en la simulación. El comportamiento de un conductor está definido por el tiempo T_c que utiliza para llevar a su vehículo, independiente de su condición de carga e inclinación del camino, a V_{ref} .

Dada la Definición 2.19, la rapidez con la cual el conductor lleva al camión a v_c , es decir la magnitud de t_c , dependerá de su T_c . El parámetro que modela al conductor define una curva velocidad característica que se puede ver como la línea sólida en la Figura 2.2.

Definición 2.20. Se denominará *pendiente de fuerza por defecto* m_{def} de un conductor al valor de m que le permite al conductor acelerar de cero a una velocidad v_c , llegando a ésta con aceleración nula, en un tiempo t_c de forma tal que la relación entre estos últimos dos valores sea:

$$\frac{v_c}{t_c} = \frac{V_{ref}}{T_c}. \quad (2.19)$$

La relación de la Ecuación (2.19) proviene del perfil de velocidad deseado de Figura 2.2. Para obtener la expresión de m_{def} , se plantea que el tiempo que el camión incrementa su aceleración (en el cual $m = +m_{def}$) deberá ser idéntico al tiempo en la cual la disminuye ($m = -m_{def}$). Esto se debe a que el camión parte de aceleración cero y para mantener una velocidad constante se debe llegar a la misma con aceleración cero. La suma de estos dos tiempos debe ser igual al t_c dado por la Ecuación (2.19). La expresión de m_{def} se ve en la Ecuación (2.20) y su derivación completa se realiza en el Apéndice A.

$$m_{def} = \frac{4MV_{ref}^2}{T_c^2 v_c} \quad (2.20)$$

La pendiente de fuerza permite al conductor definir si desea acelerar o frenar eligiendo su signo. A su vez la magnitud de la aceleración depende directamente de la magnitud de la pendiente. De aquí en más cada vez que se utilice m o m_{def} será para hacer referencia

a la magnitud de la pendiente de fuerza, ya que en todos los casos el signo de la misma se hará explícito, a menos que se aclare lo contrario.

Existen dos factores fundamentales por los cuales la aplicación de m_{def} no es directa. El primero es que la simulación es en pasos de tiempo discreto, Δt . El segundo es que un vehículo podría necesitar alcanzar su velocidad objetivo con una determinada condición de aceleración, fuerza y velocidad distintas de cero. Esto sucederá a menudo con vehículos seguidores. Por lo tanto, el algoritmo de comportamiento deberá ser lo suficientemente genérico para poder funcionar y lograr su objetivo aún en estas situaciones. Su versión final se muestra en el Algoritmo 2.1.

El vehículo que está intentando llegar a su velocidad crucero, ejecuta el Algoritmo 2.1 en cada paso temporal. Si el camión posee una fuerza efectiva exactamente nula, entonces se verifica si la velocidad del vehículo es igual, dentro de una cierta tolerancia (la cual es el parámetro de simulación tol), a la objetivo. Si este no es el caso, se deberá elegir el signo de la pendiente necesaria para reducir esta diferencia. Esta será positiva si la velocidad está por debajo de la objetivo y negativa caso contrario. El signo deberá cambiar cuando el vehículo debe dejar de acelerar (o de desacelerar) para lograr llegar a la velocidad objetivo con fuerza cero. Por este motivo, si la fuerza efectiva cambiara de signo al aplicar $\pm m_{def}$ en el próximo paso temporal, la pendiente cambia su magnitud a $\frac{-F_e}{\Delta t}$. Para saber cuando se debe realizar el cambio de signo de la pendiente, se compara el tiempo necesario para llevar a la fuerza a ser nula con el tiempo que se debería tardar en llegar a v_c (llamado T_d) y que surge de $\frac{|\Delta v|}{T_d} = \frac{V_{ref}}{T_c}$, de acuerdo a la Ecuación 2.19.

2.4.2.2. Llegar con velocidad nula al fin del camino

Este comportamiento es necesario sólo para los camiones líderes. El objetivo es reproducir la última parte del perfil de velocidad de la Figura 2.2, es decir de $t = t_e - t_c$ a $t = t_e$. La naturaleza discreta del modelo que utiliza pasos temporales dificulta lograr llegar al final del camino con velocidad cero utilizando sólo la pendiente por defecto.

Algoritmo 2.1 Alcanzar y mantener una velocidad objetivo

1. Si $F_e = 0$ entonces,
 - a) Si la diferencia entre la velocidad actual (v) y la velocidad objetivo (v_c) cae dentro de una cierta tolerancia (tol) $\implies m = 0$.
 - b) Caso contrario, $m = -m_{def}$ si $v > v_c$ y $m = m_{def}$ si $v < v_c$.

2. Si $F_e > 0$ entonces,
 - a) Si $v > v_c$ entonces
 - 1) Si aplicar $-m_{def}$ no convierte a F_e en negativa $\implies m = -m_{def}$.
 - 2) Si aplicar $-m_{def}$ convierte a F_e en negativa $\implies m = \frac{-F_e}{\Delta t}$.
 - b) Si $v < v_c$ entonces
 - 1) Si es necesario cambiar la pendiente para disminuir la aceleración \implies elegir 2a1 o 2a2, según corresponda.
 - 2) Si no es necesario cambiar la pendiente para disminuir la aceleración $\implies m = m_{def}$.

3. $F_e < 0$ entonces,
 - a) Si $v < v_c$ entonces
 - 1) Si aplicar m_{def} no convierte a F_e en positiva $\implies m = m_{def}$.
 - 2) Si aplicar m_{def} convierte a F_e en positiva $\implies m = \frac{-F_e}{\Delta t}$.
 - b) Si $v > v_c$ entonces
 - 1) Si es necesario cambiar la pendiente para disminuir la desaceleración \implies elegir 3a1 o 3a2, según corresponda.
 - 2) Si no es necesario cambiar la pendiente para disminuir la desaceleración $\implies m = -m_{def}$.

Además el cálculo de la pendiente tiene que ser lo suficientemente robusto como para contemplar cualquier situación. Es común que un vehículo se convierta en líder cerca del fin del camino cuando el camión enfrente termina su recorrido. Cuando esto sucede el camión quedará con condiciones de velocidad, fuerza y aceleración, que no se pueden presuponer. Entonces, la única forma de asegurar que el camión logre llegar al fin del camino con velocidad cero bajo cualquier conjunto de condiciones iniciales es calculando la pendiente de frenado.

Para hallar el valor de la pendiente, es necesario obtener una expresión que vincule la distancia necesaria para que la velocidad del vehículo, dada sus condiciones iniciales, se lleve a cero. Esto se hace utilizando la regla de movimiento 3. Como se supone que el camión frenará, el problema se resuelve asumiendo que $m < 0$ haciendo explícito el signo de la pendiente. Entonces, la Ecuación (2.17) se resuelve por Δt , teniendo en cuenta que $\Delta v = -v_o$ y que m es variable. El resultado es reemplazado en la Ecuación (2.18) teniendo en cuenta que Δp es la distancia al final del camino. De ésta expresión resultante, se evalúa cual es el valor necesario de m . El procedimiento completo requiere un análisis de signos para asegurar bajo que condiciones los resultados son válidos. El procedimiento completo se muestra en el Apéndice B. El resultado final es

$$m = \frac{(u - 2F_e)u}{2v_0M} \text{ donde } u \text{ es,} \quad (2.21)$$

$$u = \frac{2(3F_e\Delta p + v_0^2M) + \sqrt{6F_e\Delta pMv_0^2 + 4v_0^4M^2}}{3\Delta p}. \quad (2.22)$$

La Ecuación (2.22) dará un valor positivo de m ya que el signo negativo se hizo explícito en la derivación de la expresión. El análisis de los signos de las constantes muestra que el resultado no será válido en el caso de que $F_e < 0$ y además $v_0^2M < 2|F_e|\Delta p$. En este caso el argumento de la raíz de u sería negativo. Estas condiciones representan la situación donde la F_e , en magnitud, es tan grande que el camión se

detendrá completamente antes de llegar al fin del camino aunque el valor de m sea nulo. En caso de que ocurra esta situación, se realiza el cálculo suponiendo $F_e = 0$. Si con la pendiente calculada resulta que es realmente necesario frenar, entonces se anula F_e y se aplica esa pendiente.

Entonces, para decidir si un camión líder deberá frenar, basta con calcular la m de frenado de acuerdo a la Ecuación (2.22). En el primer paso temporal en la cual se verifique que $m \geq m_{def}$, se aplica la pendiente calculada $-m$ y se mantiene hasta el fin del camino.

2.4.2.3. Frenar para evitar colisiones.

El frenado para evitar colisiones es el comportamiento más complejo. En principio, si se detecta una condición en la cual se producirá una colisión se podría aplicar la pendiente $-m_{def}$. Sin embargo, puede ser que de un paso temporal a otro las condiciones hallan cambiado lo suficiente para que no baste con aplicar $-m_{def}$ para prevenir una colisión. Por lo tanto nuevamente es necesario calcular la pendiente de fuerza. Para ello se plantea una ecuación que represente la distancia entre dos vehículos que estén siguiendo las reglas de movimiento 3. Para todas las expresiones que se hallan a continuación, las variables asociadas al camión mas cercano al fin del camino tendrán el subíndice f y las asociadas al camión seguidor, cuya pendiente se desea calcular, tendrán el subíndice b . Teniendo en cuenta que la pendiente m_b será de frenado, el signo negativo puede hacerse explícito. Por otro lado no se hace ninguna suposición sobre el signo o magnitud de la pendiente del camión enfrente, m_{cf} . El movimiento de los camiones se regirá por la Ecuación (2.18). Por lo tanto, para poder analizar como evolucionará la distancia entre ellos en función del tiempo se realiza la resta de las ecuaciones de posición teniendo en cuenta que los coeficientes de las mismas están formados por los valores de las condiciones actuales de posición (p_f y p_b) velocidad (v_f y v_b), fuerza efectiva (F_{ef} y F_{eb}), masa (M_b y M_f) y la pendiente de fuerza que está utilizando el camión enfrente (m_{cf}). Entonces la diferencia

de la posición $\Delta p_{fb}(t)$ posee la siguiente expresión,

$$\Delta p_{fb}(t) = \frac{m_a t^3}{6M_b M_f} + \frac{\Gamma t^2}{2M_f M_b} - \Delta v_0 t, \quad (2.23)$$

donde

$$m_a = m_b M_f + m_{ef} M_b, \quad (2.24)$$

$$\Gamma = F_{ef} M_b - F_{eb} M_f \text{ y} \quad (2.25)$$

$$\Delta v_0 = v_b - v_f. \quad (2.26)$$

El objetivo es calcular m_b de tal forma que el cambio que predice la Ecuación (2.23), sumado a la distancia actual entre los camiones, no conduzca a una colisión. Los vehículos tienen una longitud l_t y la posición de cada camión representa la ubicación de su frente en el arco. Por lo tanto la condición que se debe asegurar para que no existan colisiones es que $p_f(t) - l_t > p_b(t)$. Si se considera que Δp_a es la distancia actual teniendo en cuenta esta longitud, es decir que $\Delta p_a = p_f - l_t - p_b$, entonces la diferencia de posiciones entre los vehículos en el futuro está dada por $f(t)$, la cual tiene la forma,

$$f(t) = \Delta p_a + \frac{m_a t^3}{6M_b M_f} + \frac{\Gamma t^2}{2M_f M_b} - \Delta v_0 t. \quad (2.27)$$

Por lo tanto, se debe hallar el valor de m_b positivo que garantice $f(t) > 0$ para todo t positivo. Esta no es una tarea trivial ya que $f(t)$ es una ecuación cúbica. El enfoque que se utilizó es el de hallar el tiempo en el cual se da el mínimo de $f(t)$, si este existe, y calcular m_b de tal forma de asegurarse que el mínimo sea mayor a cero. Esto implica realizar un análisis extenso de signos ya que en principio, m_a , Γ y Δv_0 pueden ser positivos o negativos. La derivación completa de los resultados se encuentra en el Apéndice C, pero a continuación se presentan los resultados finales,

$$\{\Gamma \geq 0, \Delta v_0 > 0, \mathbf{b} > 2\mathbf{a}\} \text{ o } \{\Gamma < 0, \Delta v_0 > 0\} \implies m_b > \text{máx} \left\{ \frac{u_p(u_p+2\Gamma)}{2\Delta v_0 M_b M_f^2} - m_{cf} \frac{M_b}{M_f}, 0 \right\}$$

$$\{\Gamma \geq 0, \Delta v_0 > 0, \mathbf{b} \leq 2\mathbf{a}\} \text{ o } \{\Gamma \geq 0, \Delta v_0 \leq 0\} \implies m_b > \text{máx} \left\{ -m_{cf} \frac{M_b}{M_f}, 0 \right\}$$

$$\{\Gamma < 0, \Delta v_0 < 0, m_{cf} M_b < \frac{|\Gamma|}{2|\Delta v_0| M_f M_b}\} \implies m_b > \text{máx} \left\{ \frac{u_n(u_n-2|\Gamma|)}{2\Delta v_0 M_b M_f^2} - m_{cf} \frac{M_b}{M_f}, 0 \right\}$$

$$\{\Gamma < 0, \Delta v_0 < 0, m_{cf} M_b \geq \frac{|\Gamma|}{2|\Delta v_0| M_f M_b}\} \implies m_b > 0$$

$$\{\Gamma < 0, \Delta v_0 = 0\} \implies m_b > \text{máx} \left\{ \sqrt{\frac{2|\Gamma|^3}{3M_f^3 M_b \Delta p_a}} - m_{cf} \frac{M_b}{M_f}, 0 \right\}$$

En las soluciones anteriores las constantes se definen como,

$$\begin{aligned} a &= \Delta p_a \Gamma, \\ b &= \Delta v_0^2 M_f M_b, \\ u_p &= \frac{-2(3a - b) + \sqrt{4b^2 - 6ab}}{3\Delta p_a} \text{ y} \\ u_n &= \frac{-2(3a - b) - \sqrt{4b^2 - 6ab}}{3\Delta p_a}. \end{aligned}$$

Como las condiciones del vehículo enfrente pueden cambiar de un instante a otro, un camión seguidor deberá calcular su pendiente de freno en cada paso temporal para definir si frenar o no.

Las expresiones halladas sólo permiten calcular la pendiente que debe utilizar un vehículo que quiere frenar para asegurarse de no chocar con el vehículo enfrente, asumiendo que ambos se mueven con la regla de movimiento 3. Sin embargo, es necesario establecer cuando es necesario utilizar la pendiente que se calculó. Utilizarla sólo cuando es mayor que la pendiente por defecto no es suficiente. Deben contemplarse tres situaciones concretas.

La primera situación, la más crítica, es que es posible que el vehículo comience a moverse bajo las reglas 1 o 2, con lo cual las predicciones hechas utilizando la regla 3 son inválidas. Se considera que existe una situación de riesgo si la distancia entre vehículos es menor que la *distancia de seguridad*, la cual se calcula a base de las reglas 1 y 2 de acuerdo a lo establecido por el Apéndice D. Esto implica que si el camión cambiara del régimen de la regla 3 a la 1 o 2 entonces no se puede garantizar que se evite el choque y por lo tanto se frena de forma preventiva con una pendiente de una magnitud de, al menos, m_{def} .

El camión deberá presentar un comportamiento razonable. Esto es importante en la segunda situación ya que se presenta cuando un camión evita todas las colisiones frenando hasta detenerse por completo o cuando la distancia con el vehículo enfrente es muy grande. La tercer situación se da cuando un camión utiliza desaceleraciones de magnitudes inaceptables. Si un vehículo evita las colisiones bajando su velocidad en 30 km/hr en el espacio de 1 segundo (desaceleración de -8.33 m/s^2), se puede decir que esto no es un comportamiento razonable. Establecer un límite numérico aceptable de aceleración y de desaceleración máxima no es trivial. Por este motivo se buscó en la literatura ejemplos de valores realistas de estas magnitudes. En [21] se ve que un valor para el cual el frenado no es incómodo para el conductor son -2 m/s^2 . Esta magnitud se ve también como un valor máximo de aceleración en [22] en camiones de ruta. Estos dos factores hicieron que se considere entonces que la máxima aceleración (positiva o negativa) permitida, denominada a_{max} , sea de 2 m/s^2 . Si la mayoría de las aceleraciones que se registran en diversas situaciones caen por debajo de este valor, se puede considerar que el comportamiento es razonable.

Para evitar las situaciones planteadas se utiliza el tiempo donde ocurre, de existir, el mínimo de $f(t)$. Si el mínimo no existe, entonces no es necesario frenar por que la distancia entre los vehículos será monótonamente creciente de acuerdo al análisis que se presenta en el Apéndice C. Cuando llegue el tiempo de la distancia mínima, será necesario

frenar sólo si la velocidad del camión bajo consideración es mayor que la velocidad del vehículo que tiene por delante. De esta forma se evita los frenados a distancias muy grandes.

Si la condición anterior se verifica, se realiza una comparación de la distancia a la que quedarán en el tiempo del mínimo (de aplicar la pendiente calculada) con respecto a una *distancia de seguridad aumentada*. Esta es la distancia de seguridad común multiplicada por una constante que es la relación entre la pendiente calculada y la pendiente por defecto. Esto hace que a medida que la pendiente de frenado necesaria sea cada vez mas grande también será mas grande la distancia a la cual se hará el frenado preventivo, evitando así desaceleraciones muy grandes. El uso de la comparación con los tiempos previene que un vehículo frene a una distancia demasiado grande del camión de enfrente.

Resumiendo el comportamiento de un conductor en un vehículo seguidor tiene la siguiente jerarquía

1. El vehículo deberá frenar si se dan una de las siguiente condiciones
 - a) Está lo suficientemente próximo al vehículo de enfrente que un cambio en la regla de movimiento lo pondría en una situación en la que no es posible evitar el choque.
 - b) Se cumplen dos condiciones. La primera es que en el tiempo futuro, donde se predice la mínima distancia entre los vehículos, la velocidad del camión es superior que la del camión que tiene por delante. La segunda condición que se debe verificar que de frenar la distancia entre los vehículos terminará siendo menor que la distancia de seguridad aumentada.
2. Si el vehículo no debe frenar para evitar una colisión, entonces utiliza el algoritmo para alcanzar su velocidad crucero de la Sección 2.4.2.1

Capítulo 3

Selección de destinos

3.1. Motivación

Durante la operación de una mina, la flota de vehículos de transporte debe mover material entre los puntos de carga y descarga. Una vez vacío, el vehículo volverá a buscar más material. Este comportamiento se repite una y otra vez de forma ininterrumpida durante la duración de la simulación. Ésta descripción sugiere un comportamiento cíclico para la flota de vehículos. Por lo que es razonable pensar que si los vehículos obedecen las instrucciones del sistema de despacho y no hay mayores inconvenientes (como accidentes o cambios de objetivos en el plan estratégico), entonces la flota entrará en un estado estacionario cíclico que permite predecir cuanto tiempo les llevará cada descarga, sabiendo sólo a que destino deberán ir y los tiempos de viaje. Este concepto provee la motivación principal para crear un modelo que permite predecir la productividad a partir de una secuencia de despacho fija, que asegure el comportamiento cíclico.

3.2. Secuencia de despacho

Para poder analizar la productividad y los tiempos de ocio del equipamiento es necesario suponer un orden en el cual un conjunto de camiones visita los nodos destino de un determinado grafo. Además se debe tener en cuenta que para poder lograr algún tipo de predicción este orden debe mantenerse a lo largo de la ventana de tiempo (T_{ST} de acuerdo a la Definición 2.9) en la cual se analiza la operación minera. Esto, junto con la motivación presentada, lleva al concepto de crear un metodología de despacho que realice la selección de destinos de forma cíclica.

Definición 3.1. Se define como s_{qx} la *secuencia que indica el orden de los nodos de carga* a los cuales se enviarán los camiones a medida que se encuentren disponibles luego de cada descarga. Esta secuencia será de longitud C_x . De la misma forma s_{qy} es la *secuencia que indica el orden de los nodos de descarga* a los cuales se enviarán los camiones a medida que se encuentren disponibles luego de cada carga y la longitud de la misma será C_y . Además se denomina como x_i el número de visitas al nodo de carga $L_i \in \mathbf{L}$ en la secuencia s_{qx} y como y_j a el número de visitas al nodo de descarga $U_j \in \mathbf{U}$ en la secuencia s_{qy} . Al conjunto de valores x_i se lo nota como \mathbf{X} y al conjunto de valores de y_j se lo nota \mathbf{Y} .

Es claro de la Definición 3.1 que se pueden calcular C_x y C_y de la siguiente forma,

$$C_x = \sum_{i=1}^S x_i, \quad (3.1)$$

$$C_y = \sum_{j=1}^P y_j. \quad (3.2)$$

El análisis sobre la secuencia de despacho se centra sobre un estado estacionario, en el cual se puede analizar una ciclo global surgido de aplicar de forma constante las secuencias individuales de los nodos de carga y descarga. Este ciclo se verá cuando en

un determinado intervalo de tiempo se haya completado, simultáneamente, un número entero de ciclos de s_{qx} y de s_{qy} . Cuando esto suceda, se sabrá exactamente cuantos camiones han descargado en ese intervalo de tiempo y este valor se podrá extrapolar a T_{ST} .

Definición 3.2. La *secuencia global* se arma asumiendo que se seleccionará un nodo de carga por cada nodo de descarga, de forma intercalada, eligiendo cada nodo de acuerdo a las secuencias s_{qx} y s_{qy} . A esta secuencia se la notará como s_q .

Por convención, se asumirá que una secuencia s_q comenzará con un viaje desde el nodo del final de la secuencia s_{qy} , denominado U_0 hacia el primer nodo de carga de la secuencia s_{qx} , denominado L_0 . El próximo nodo de descarga que se elegirá será el primero de s_{qy} , y luego de esto el próximo nodo de carga será el segundo de s_{qx} y se continuará de esa forma. La secuencia global s_q finalizará cuando un vehículo descargue en U_0 y siendo el próximo destino nuevamente L_0 . Este evento sucederá siempre que se halla recorrido s_{qx} y s_{qy} un número entero de veces. Entonces es siempre posible hacer que s_q tenga una longitud $2C_xC_y$ ya que se desea que s_q represente un ciclo y por ende deberá contener el mismo número de visitas a los nodos de carga que a los de descarga. La forma mas simple de garantizar esto es que el total de visitas a cada conjunto de nodos sea C_xC_y , para garantizar el número entero de recorridos por cada secuencia individual. Como se visitan los nodos de cada grupo un total de C_xC_y veces entonces s_q tendrá una longitud de $2C_xC_y$. La Figura 3.1, muestra el concepto de la secuencias global.

Es muy importante notar que durante una simulación, las secuencias de despacho que se utilizarán son s_{qx} y s_{qy} . La secuencia global, en general, no surgirá como está descripta en la Figura 3.1. Esto es fácil de ver, ya que si es necesario enviar dos camiones a nodos de carga, sin que haya un despacho a un nodo de descarga entre ellos, en la secuencia global aparecerán dos nodos de carga consecutivos. Sin embargo la secuencia s_{qx} si se respetará y lo mismo es verdad con la secuencia s_{qy} . La idea atrás de esta metodología de las secuencias es que existirá un estado estacionario en el cual, en una ventana de

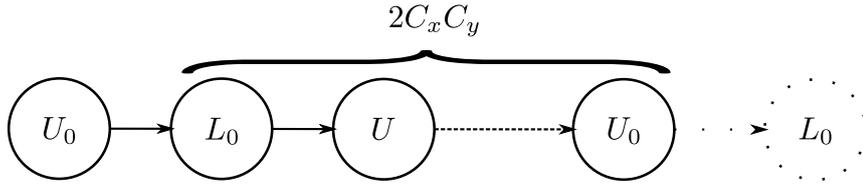


Figura 3.1: Representación de una secuencia de despacho s_q . La secuencia se forma alternado un nodo de la secuencia de despacho de los nodos de carga con uno de la secuencia de despacho de los nodos de descarga. Cuando cada secuencia sea recorrida un número entero de veces, se podrá decir que se completó la secuencia global.

terminada de tiempo, se completará un número entero de ciclos de cada una de estas secuencias. En este intervalo de tiempo es posible saber cual fue la productividad debido a que se sabe la cantidad de visitas a cada nodo dentro de las secuencias individuales. Por lo tanto, si bien s_q no existirá necesariamente como está presentada, si es útil como una representación de lo que sucederá en el estado estacionario.

Definición 3.3. Dada una flota de N camiones, el intervalo de tiempo necesario para completar una secuencia s_q , o lo que es lo mismo, que existan $C_x C_y$ descargas y cargas, se denomina *duración de la secuencia global* y se nota Φ_N .

De acuerdo a la Definición 3.3, un ciclo completo de la secuencia s_q tendrá una productividad de $C_x C_y$, ya que este es el número de visitas al conjunto de nodos de descarga. Esto permite calcular el número de descargas en cada U_j como $C_x y_j$ y el número de cargas en cada L_i como $C_y x_i$. Por lo tanto durante el tiempo que dura un ciclo es posible conocer la productividad y además el tiempo que estuvo trabajando cada nodo destino. Efectivamente, los tiempos de trabajo se pueden expresar como

$$W_{s_i} = C_y x_i t_{s_i} \quad (3.3)$$

$$W_{p_j} = C_x y_j t_{p_j} \quad (3.4)$$

Las expresiones de las Ecuaciones (3.3) y (3.4) son consecuencia directa de que sólo un

vehículo puede ser atendido a la vez en cada nodo.

El valor de Φ_N dependerá de la cantidad de visitas a cada nodo, el orden en el que se hacen las mismas, de los tiempos de viaje, de los tiempos de servicio y del tamaño de la flota en la mina. Este tiempo será crucial para el desarrollo del modelo de productividad. Aproximar este valor es uno de los principales desafíos del desarrollo de la metodología de selección de destinos propuesta.

El objetivo de las técnicas desarrolladas en lo que resta del capítulo será encontrar un par de conjuntos de valores \mathbf{X} e \mathbf{Y} que permitan optimizar los índices de desempeño de una mina, particularmente la productividad y el tiempo de ocio acumulado. Por lo tanto se refiere al par (\mathbf{X}, \mathbf{Y}) como una solución.

3.2.1. Ciclo para un solo vehículo

Para poder predecir la productividad y el tiempo de ocio de los nodos es necesario hallar una forma de calcular la duración, en tiempo, de una secuencia de despacho completa. Para ello se comienza el análisis cuando el tamaño de la flota es de un sólo vehículo, es decir Φ_1 . En este caso particular, la secuencia s_q surgirá exactamente como se muestra en la Figura 3.1 ya que al haber un solo vehículo un despacho hacia un nodo de carga seguirá inevitablemente de un despacho a un nodo de descarga.

Como la secuencia s_q se seguirá de forma conocida, es posible calcular exactamente el valor de la duración del ciclo completo. Este será el tiempo total de viaje del vehículo, denominado T_t , y el tiempo total de trabajo W_t , es decir que

$$\Phi_1 = W_t + T_t. \quad (3.5)$$

Esto es consecuencia de que el tiempo de espera será exactamente cero y por ende el camión estará viajando o en servicio. Ambas magnitudes dependerán de la cantidad de veces que es visitado cada nodo de carga y descarga (x_i e y_j). El tiempo total de trabajo

es la suma de los tiempos de trabajo de cada nodo de forma individual que están dados por las Ecuaciones (3.3) y (3.4). Así se tiene que,

$$W_t = \sum_{i=1}^S W_{s_i} + \sum_{j=1}^P W_{p_j}. \quad (3.6)$$

El cálculo de T_t no es tan directo. La expresión general de T_t es la suma de las veces que cruzó cada arco multiplicado por su tiempo asociado. Esto es,

$$T_t = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^P R_{ij} r_{ij} + \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^P Q_{ij} q_{ij}, \quad (3.7)$$

donde R_{ij} es el número de veces que el vehículo viajó de L_i a U_j , mientras que Q_{ij} es el número de veces que hizo el camino inverso. Dado que se desea calcular estos valores dentro de un ciclo y que son números naturales es posible demostrar que $R_{ij} = Q_{ij} = x_i y_j$.

Se comienza observando que la suma de viajes de todos los nodos de carga a cada nodo de descarga debe ser igual al número de veces que cada nodo de descarga fue visitado durante el ciclo. Lo mismo es verdad para cada punto de carga. Esto se expresa de la siguiente forma,

$$\sum_{i=1}^S R_{ij} = C_x y_j \quad (3.8)$$

$$\sum_{j=1}^P Q_{ij} = C_y x_i. \quad (3.9)$$

Además se observa que, en un ciclo, el número de camiones que son enviados desde cada nodo debe ser igual al número de camiones que fueron atendidos en el nodo, para mantener el hecho de que el número de visitas a los nodos de carga y descarga es igual. Esto implica que,

$$\sum_{j=1}^P R_{ij} = C_y x_i \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^S Q_{ij} = C_x y_j. \quad (3.11)$$

Finalmente se observa que tanto Q_{ij} y R_{ij} son números naturales. Por lo tanto, analizando los R_{ij} , debe existir un número racional K'_i menor a uno tal que, $R_{ij} = K'_i C_x y_j$, lo que se desprende de la condición que impone la Ecuación (3.8). Sin embargo, la Ecuación (3.10) implica que,

$$\sum_{j=1}^P R_{ij} = \sum_{j=1}^P K'_i C_x y_j = K'_i C_x C_y = C_y x_i. \quad (3.12)$$

Esto lleva a que $K'_i = \frac{x_i}{C_x}$, por lo que finalmente $R_{ij} = x_i y_j$. Es posible utilizar el mismo procedimiento para llegar a la conclusión de que $Q_{ij} = x_i y_j$.

Reemplazando estos resultados en la Ecuación (3.7), se obtiene la expresión final

$$T_t = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^P x_i y_j (q_{ij} + r_{ij}). \quad (3.13)$$

Utilizando las Ecuaciones (3.13), (3.6) y (3.5), es posible calcular cuanto tiempo necesitará un vehículo, dada las secuencias s_{qx} y s_{qy} en realizar $C_x C_y$ descargas.

3.2.2. Ciclo para una flota de tamaño N

La Ecuación (3.5) permite calcular el tiempo de ciclo de un vehículo y por ende predecir la productividad y los tiempo de ocio de nodos destinos, para una dada solución. El próximo desafío será utilizar el resultado para poder calcular el tiempo de la duración de la secuencia cuando la flota consiste en N vehículos.

Cuando un solo camión recorre la mina con una secuencia específica, en un intervalo

de tiempo Φ_1 , habrá descargado $C_x C_y$ veces. Por lo tanto, en una primera aproximación sería posible decir que N camiones descargarían un total de $NC_x C_y$ en el tiempo Φ_1 . Esta estimación interpreta el flujo de vehículos en la mina como una hilera de N camiones atravesando linealmente la secuencia de nodos (la que se ve en la Figura (3.1)), obteniendo $NC_x C_y$ descargas por cada vez que la secuencia es completada. Es importante aclarar que esto es sólo una estimación del comportamiento global de la mina y que no es lo que sucede realmente. Si bien es posible saber que secuencia seguirá un solo camión, realizar una generalización que permita obtener la secuencia que seguirá cada camión (que serán distintas), es mucho más complicado.

Aún teniendo en cuenta esto último, la aproximación propuesta no contempla los retrasos que producen los tiempos de espera en cada uno de los nodos de la secuencia, los cuales serán cada vez más significativos conforme aumenta el valor de N . Por lo tanto, el tiempo necesario para que la flota de N vehículos complete la secuencia será mayor a Φ_1 . Es posible estimar este tiempo mediante una corrección a Φ_1 , particularmente $\Phi_1 + \gamma$, donde γ es una variable que contempla los retrasos debido a los tiempos de espera de cada camión. Debido a la complejidad de un análisis completo de las secuencias individuales y al hecho de que ya se realizó una simplificación importante, el valor de γ se construye de forma puramente intuitiva y no está derivado de ninguna expresión matemática. Este se puede ver en la Ecuación (3.14).

$$\gamma = \underbrace{\frac{N W_t}{2 T_t}}_{\text{Tamaño de cola}} * \underbrace{\frac{T_{ser}}{S + P}}_{\text{Tiempo de espera}} \quad (3.14)$$

El valor de γ está compuesto de dos partes. La primera parte representa un tamaño de cola promedio y una segunda parte, que multiplica a la primera, representa un tiempo promedio de espera. El tamaño de cola promedio se arma a partir de la multiplicación

de dos términos. El primero establece un tamaño de cola de la mitad de la flota ($\frac{N}{2}$). Este tamaño estándar, se modula por la relación entre el tiempo de viaje y el tiempo de trabajo ($\frac{W_t}{T_t}$) hallado cuando un camión solo recorre la secuencia de despacho. Esto representa que el tamaño de cola esperado será mayor conforme mas tiempo un camión deba trabajar con respecto al tiempo que deba viajar, ya que esto implica mayor tiempo en los nodos y menos tiempo avanzando en los caminos. El tiempo de espera promedio es simplemente el promedio de los tiempos de servicio, es decir que T_{ser} es,

$$T_{ser} = \sum_{i=1}^S t_{s_i} + \sum_{j=1}^P t_{p_j}. \quad (3.15)$$

Utilizando la aproximación de γ , es posible decir que NC_xC_y camiones visitan los nodos de descarga en un intervalo de tiempo de $\Phi_1 + \gamma$. Sin embargo, esta expresión implica que al aumentar N el tiempo Φ_N , necesario para realizar C_xC_y descargas, se hace cada vez más chico y no existe ningún límite para cuanto puede reducirse. Esto, claramente, no puede ser así. Cuando el tamaño de flota sea lo suficientemente grande como para garantizar que tan pronto un camión termine su tarea en un nodo, otro tome su lugar, entonces, la productividad no se incrementará mas. En esta situación el tiempo de duración de la secuencia deberá ser al menos el tiempo de trabajo mas grande de entre todos los nodos, ya que si fuera menor que tal valor, uno de los nodos no completaría su cuota de la secuencia. Este límite inferior de Φ_N se denomina Φ_0 ,

$$\Phi_0 = \text{máx}\{\text{máx}_i W_{s_i}, \text{máx}_j W_{p_j}\} \quad (3.16)$$

Utilizando Ecuación (3.16) es posible estimar el tiempo que tardarán N vehículos en descargar C_xC_y veces con la expresión,

$$\Phi_N = \text{máx}\left\{\frac{\Phi_1 + \gamma}{N}, \Phi_0\right\}. \quad (3.17)$$

Es posible, entonces, utilizar al Ecuación (3.17) para predecir la productividad y el tiempo total de ocio de los nodos de una dada mina durante una ventana de tiempo T_{ST} y para una dada solución \mathbf{X} y \mathbf{Y} .

3.3. Modelo de productividad para una secuencia

El modelo de productividad y tiempo de ocio utiliza las ecuaciones desarrolladas en secciones anteriores para extrapolar el valor de estos índices de desempeño a una cantidad arbitraria de tiempo. La predicción de la productividad se puede hacer con una aproximación lineal. Por definición Φ_N es el tiempo que tardan N camiones en realizar $C_x C_y$ descargas. Por lo tanto la productividad en T_{ST} será,

$$P_p = \frac{T_{ST} C_x C_y}{\Phi_N}. \quad (3.18)$$

En la Ecuación (3.18), P_p es la *predicción de productividad*.

La *predicción de los tiempos de ocio de cada nodo* puede ser calculada restando el tiempo que el nodo estuvo ocupado a la duración de un ciclo. Es decir,

$$I_{s_i} = \Phi_N - W_{s_i} \quad (3.19)$$

$$I_{p_j} = \Phi_N - W_{p_j}, \text{ por lo tanto} \quad (3.20)$$

$$I_{tc} = \sum_{i=1}^S I_{s_i} + \sum_{j=1}^P I_{p_j}. \quad (3.21)$$

De esta forma la misma aproximación lineal puede utilizarse para calcular la *predicción del tiempo de ocio total* I_{tp} ,

$$I_{tp} = \frac{T_{ST} I_{tc}}{\Phi_N}. \quad (3.22)$$

3.4. Secuencia de despacho a partir de una solución

Teniendo una solución (vectores \mathbf{X} e \mathbf{Y}), se debe transformar cada vector en una secuencia de despacho de nodos de carga y descarga. La idea fué intentar hallar una secuencia que distribuya los vehículos de la forma mas equitativa posible (dentro de las diferencias de proporciones). Es simple ver los beneficios de esto con un ejemplo. Sea un vector solución para los nodos de carga $\mathbf{X} = \{2, 3\}$. En este caso dos posibles secuencias con estas proporciones serían $s_{qx1} = \{L_1, L_1, L_2, L_2, L_2\}$ y $s_{qx2} = \{L_2, L_1, L_2, L_1, L_2\}$. Es fácil ver que, en este caso, la secuencia s_{qx2} distribuirá mejor los vehículos ya que los enviará de forma alternante a los nodos de carga. De esta forma, no mas de dos vehículos seguidos irán al nodo L_2 y además nunca habrá dos vehículos seguidos despachados al L_1 . En la secuencia s_{qx1} , se envían de forma consecutiva tres vehículos a L_2 , y dos a L_1 , lo que aumentará los tiempos en colas.

Generalizando esta idea, los destinos de los vehículos, dentro de una secuencia, deberían esparcirse dentro de la misma de forma de lograr la menor cantidad camiones consecutivos enviados a un nodo en particular. Para poder implementar una metodología a partir de ésta idea se introduce el concepto de proporciones objetivo o valores α .

Definición 3.4. Se definen como *proporciones objetivo o valores α* a las proporciones de vehículos que deben ser enviados a cada nodo de acuerdo a la solución provista por los vectores \mathbf{X} e \mathbf{Y} . Por lo tanto tendrán la siguiente forma

$$\alpha_{s_i} = \frac{x_i}{C_x} \text{ y} \quad (3.23)$$

$$\alpha_{p_j} = \frac{y_j}{C_y}. \quad (3.24)$$

Las Ecuaciones (3.23) y (3.24) permiten enunciar la idea de la mejor distribución de

camiones de la siguiente manera: enviar el próximo camión disponible a aquel nodo que más alejado esté de su proporción objetivo. Sea β_{s_i} la razón de vehículos que han visitado el nodo L_i sobre todos los vehículos que han cargado material y sea β_{p_j} la razón de vehículos que han visitado al nodo U_j sobre todos los vehículos que han descargado material. Entonces el próximo vehículo que deba ir a un nodo de carga será enviado al nodo que tenga la mayor diferencia entre $\alpha_{s_i} - \beta_{s_i}$. La misma estrategia y razonamiento es utilizado para el próximo vehículo que deba escoger un lugar de descarga.

Es posible construir una secuencia de despacho aplicando sucesivamente esta regla hasta que el número de camiones enviados coincida con la longitud de la secuencia (C_x o C_y).

3.5. Algoritmos para el cálculo de soluciones

Se ha presentado un modelo que permite la evaluación de la productividad esperada de una operación minera en función del tamaño de la flota de vehículos de carga y la solución (vectores \mathbf{X} e \mathbf{Y}) que corresponden a una secuencia de despacho periódica. En esta sección se verán dos metodologías, una que utiliza el modelo completo y otra que utiliza una versión simplificada del mismo, para hallar una solución.

3.5.1. Maximizar productividad (MP)

El algoritmo busca una solución que maximice la productividad, de acuerdo a la evaluación de la Ecuación (3.18). Las soluciones son infinitas por lo que la búsqueda se hace en un subconjunto finito. Esto implica que se debe establecer un criterio que permita definir el conjunto de soluciones que se evaluarán.

Definición 3.5. Se denomina *distancia máxima entre componentes de un vector \mathbf{v}* (o $\text{DMC}(\mathbf{v})$) a la diferencia entre el componente más grande y el más chico de \mathbf{v} . Es decir que $\text{DMC}(\mathbf{v}) = \max\{\mathbf{v}\} - \min\{\mathbf{v}\}$.

Los vectores de una solución (\mathbf{X} e \mathbf{Y}) con un valor de DMC muy grande son problemáticos. Esto se debe a que generan secuencias de despacho en las que uno o más nodos son visitados con una frecuencia muy inferior a los demás nodos del mismo conjunto. Esto conlleva a una utilización muy dispar del equipamiento. Estas soluciones no son aceptables ya que implican que existirá un equipo que es muy poco utilizado. Para evitar este tipo de problemas, el algoritmo busca sólo soluciones con valores de $DMC(\mathbf{X})$ y $DMC(\mathbf{Y})$ menores a un cierto valor máximo, denominado DCM_{max} el cual es un parámetro del algoritmo de búsqueda de soluciones.

Por lo tanto para hallar una solución válida para una dada mina y un tamaño de flota asociado, se evalúan todas las soluciones que posean un DMC menor o igual al máximo establecido y se escoge aquella que tenga la mayor productividad de acuerdo a la Ecuación (3.18).

3.5.2. Minimizar tiempos de ocio de los nodos (MI)

Utilizar la Ecuación (3.18) junto con la Ecuación (3.17) para estimar la duración de una secuencia, implica utilizar un modelo completo de la mina. Esto puede ser problemático ya que si el modelo difiere mucho de la realidad las predicciones no serán confiables.

Es posible utilizar un método de cómputo de la solución sin depender de los tiempos de viaje o del tamaño de la flota. Si se considera que en un caso estándar una mina tendrá una flota de camiones lo suficientemente grande como para lograr mantener a los nodos ocupados la mayoría del tiempo, entonces es posible decir directamente que $\Phi_N = \Phi_0$. Esta simplificación hace que la productividad dependa sólo de la relación de los tiempos de servicio y de la solución propiamente dicha.

Sin embargo ya no es posible utilizar el método anterior para hallar una solución, como se verá a continuación. Es posible asumir, sin pérdida de generalidad, que el tiempo de trabajo mas grande de todos los nodos destinos corresponde al nodo de carga L_k .

Entonces $\Phi_0 = W_{s_k}$, de esta forma la productividad que se predice queda de la forma $P_p = \frac{C_x}{x_k t_{s_k}}$. Por lo tanto maximizar la productividad implica aumentar el tamaño de la secuencia con respecto a las visitas al nodo de carga k-ésimo. Aunque se cambie el valor de un componente o el valor de Φ_0 corresponda a un nodo de descarga, la expresión será siempre la misma y la solución final tenderá a crear soluciones con el DMC alto.

Por este motivo, se optó por hallar las soluciones intentando minimizar el tiempo de ocio de los nodos, establecido por la Ecuación (3.21), para una secuencia completa. En una primera aproximación, de la Ecuación (3.16) y de la Ecuación (3.21) se puede ver que el mínimo tiempo de ocio será cero y se logrará cuando el tiempo de trabajo de todos los nodos, tanto de carga como los de descarga sean iguales entre sí. Sin embargo esto impone una restricción sobre las componentes de la solución,

$$W_{s_i} = W_{p_j} = \Phi_0$$

$$C_y x_i t_{s_i} = C_x y_j t_{p_j} = \Phi_0$$

por lo tanto

$$y_j = \frac{\Phi_0}{C_x t_{p_j}}, \quad x_i = \frac{\Phi_0}{C_y t_{s_i}}.$$

De la Ecuaciones (3.1) y (3.2) se tiene que,

$$C_y = \frac{\Phi_0}{C_x} \sum_{j=1}^P \frac{1}{t_{p_j}}, \quad C_x = \frac{\Phi_0}{C_y} \sum_{i=1}^S \frac{1}{t_{s_i}}$$

Lo que implica que,

$$\sum_{j=1}^P \frac{1}{t_{p_j}} = \sum_{i=1}^S \frac{1}{t_{s_i}}.$$

Algoritmo 3.1 Buscador $-\alpha$

1. Inicializar \mathbf{X} e \mathbf{Y} con todos sus componentes en uno. Este resultado es guardado como la mejor solución. También se guarda el h_m para esta solución.
 2. Se calcula el ciclo de vehículos, y los tiempos de trabajo para cada nodo utilizando las Ecuaciones (3.1)(3.2)(3.3)(3.4).
 3. Se utiliza la Ecuación (3.16) para calcular Φ_0 , guardando el tipo de nodo que tiene el valor máximo (de carga o descarga).
 4. Se computan los tiempos de ocio aproximados y la figura de mérito con las Ecuaciones (3.21) y (3.25).
 5. Si el valor de h_m es menor que el valor previamente guardado para la mejor solución, entonces la solución actual es guardada como la mejor al igual que su figura de mérito.
 6. Si Φ_0 es un tiempo que corresponde a un punto de carga, entonces la componente de \mathbf{X} correspondiente al nodo con mayor tiempo de ocio se incrementa en uno. Caso contrario, la componente de \mathbf{Y} correspondiente al punto de descarga con el mas alto tiempo de ocio, se incrementa en uno.
 7. Si se llegó al fin, la mejor solución hallada hasta el momento es el resultado. De lo contrario se vuelve al paso 2.
-

Esta última igualdad es una condición muy fuerte sobre los tiempos de servicio de la mina, y no se puede asegurar su cumplimiento. Por lo tanto para poder hallar una solución que intente minimizar los tiempos de ocio y que no agregue mas restricciones, se optó por desarrollar un algoritmo de búsqueda. Éste algoritmo consiste en realizar un conjunto de cambios a una solución inicial, buscando en cada iteración hacer más pequeño el índice dado por,

$$h_m = \frac{I_{t_c}}{C_x C_y}. \quad (3.25)$$

Esta figura de mérito indica la cantidad de tiempo de ocio acumulado para lograr un determinado nivel de productividad por ciclo.

El algoritmo completo, denominado Buscador $-\alpha$, es el 3.1. Su nombre hace referencia

al hecho de que su objetivo es encontrar las proporciones objetivo de cada nodo, los valores α .

El algoritmo comienza inicializando los vectores de solución de tal forma que todos sus componentes sean uno. Esta solución es conocida como la *solución estándar* e implica que el número de camiones que se enviarán a cada nodo de un conjunto es el mismo. En cada iteración se calcula la figura de mérito de la solución actual y se coteja la figura de mérito de la mejor solución hallada hasta ese punto. Si el valor de h_m de la solución actual es menor que el de la mejor solución entonces la solución actual se guarda como la mejor.

Una vez que se ha realizado la comparación de la figura de mérito, se intenta hallar una solución que la disminuya aún más. Para ello se observa a que conjunto de nodos pertenece el valor de Φ_0 . Es posible asumir, sin pérdida de generalidad, que Φ_0 corresponde al tiempo de trabajo del nodo de carga k , entonces $\Phi_0 = C_y x_k t_{s_k}$. Por lo que las expresiones para los tiempos de ocio toman la forma de,

$$I_{s_i} = C_y x_k t_{s_k} - C_y x_i t_{s_i} \text{ y}$$

$$I_{p_j} = C_y x_k t_{s_k} - C_x y_j t_{p_j}.$$

En estas ecuaciones se puede ver que al incrementar cualquier componente de \mathbf{X} , a excepción de x_k , hará que el segundo término de la resta se haga mayor manteniendo el primer término igual. Esto producirá una disminución del tiempo de ocio total. Entonces, lo más razonable sería incrementar la componente vinculada al nodo con el mayor tiempo de ocio. Si este corresponde a un nodo de carga (que no será el k -ésimo ya que el tiempo de ocio del mismo será cero), aumentar la componente asociada a ese nodo disminuirá el tiempo de ocio correspondiente además de disminuir el tiempo de ocio de todos los nodos de descarga ya que aumenta C_x . Sin embargo si el mayor tiempo de ocio de

todos los nodos corresponde a un nodo de descarga, entonces aumentar la componente asociada al mismo podría ser contraproducente. Esto se debe a que aumentaría C_y que también forma parte del Φ_0 . Por lo tanto nuevamente es conveniente aumentar el valor del componente de \mathbf{X} correspondiente al nodo de carga con el mayor tiempo de ocio. Se puede realizar un análisis análogo en el caso de que Φ_0 corresponda al tiempo de trabajo un nodo de descarga. En conclusión, la mejor opción es incrementar el componente de \mathbf{Y} correspondiente al nodo de descarga con el mayor tiempo de ocio.

Es posible que estos cambios incrementen el tiempo total de ocio en lugar de disminuirlo. Esto se debe que al aumentar una componente, en la próxima iteración el tiempo de trabajo que establece Φ_0 podrá corresponder a otro nodo. Por ende h_m crecería en lugar de disminuir.

Finalmente, cabe aclarar que los componentes de los vectores de solución se incrementan en uno. De esta forma la modificación a la solución se hace en el menor valor natural posible. Esto asegura que buenas soluciones no sea pasadas por alto.

3.6. Metodologías de referencia

Se implementaron tres políticas de referencia distintas para poder medir la efectividad de las metodologías de despacho propuestas. El objetivo es comparar los índices de desempeño explicados en la Sección 2.2 aplicando las distintas técnicas en una misma mina, con la mismas condiciones de borde e inicialización. En esta sección se exponen dichas metodologías y además se hace un breve análisis de sus ventajas y desventajas.

3.6.1. Minimizar el tiempo de espera de un camión (EC)

Esta regla heurística fue implementada de la misma forma en la que se explicó en [8] y [11]. En el momento de tomar una decisión de despacho se calculan dos tiempos para cada nodo destino posible, el TLN y el TCL. El TLN es la estimación de cuando

estará listo un nodo y que a su vez es una suma de dos tiempos: el tiempo que tardará en finalizar su tarea el último camión en la cola del nodo y el tiempo que se necesitará para atender a todos los camiones que se encuentran, en ese momento, en camino al nodo. El TCL es el tiempo insumido para que el camión esté listo y, por definición, su valor es el tiempo de viaje.

Con estas dos magnitudes se forma una figura de mérito para cada nodo calculando la diferencia, TLN - TCL. El valor mas pequeño de la diferencia indicará el nodo en el cual el vehículo podrá ser atendido en la menor cantidad de tiempo y será el destino seleccionado. En el caso de que existan dos posibles destinos con igual figura de mérito, el empate puede romperse de forma determinista o aleatoria. La forma determinista implica siempre elegir el primer nodo de la lista de posibles destinos que posean la misma figura de mérito. En la forma aleatoria, todos los nodos con la misma figura de mérito tienen igual probabilidad de ser elegidos y la selección es aleatoria. Cómo tomar las decisiones, en estos casos, es un parámetro de simulación.

La desventaja principal de esta política es que tenderá a utilizar menos a las palas que estén mas alejadas de los puntos de carga. Esto implica un uso dispar de los recursos de la mina. Además si los tiempos de viaje y espera calculados se apartan mucho de los reales, la figura de mérito no será buena y consecuentemente las decisiones que se adopten en base a ellas no serán adecuadas.

3.6.2. Cola mas corta (CM)

Esta política es una variación de la metodología anterior. Su idea es simple, en el momento que un camión requiere una decisión de despacho, se le asigna como destino aquél nodo que tendrá la cola que se espera sea mas corta. Para estimar la longitud de la cola en un nodo, se suma el número de camiones enviados a dicho nodo con el número de camiones en la cola en el momento. Este valor se denomina *cola esperada*.

Las ventajas mas inmediatas de esta política son su simpleza y su generalidad. Su

efectividad no dependerá del tamaño de la mina bajo consideración y por sobre todo no utiliza ningún modelo. El método no funcionará bien con flotas pequeñas ya que en ese caso serán frecuentes las colas de igual longitud. Su principal desventaja es que ignora casi todos los aspectos de la mina, concentrándose en un solo objetivo.

3.6.3. Programación Lineal (PL)

Existen dos obstáculos principales para implementar una política de despacho basada en la resolución de un problema de programación lineal. El primero es que el problema planteado represente apropiadamente la realidad y lo que se quiere conseguir, ya que de esto dependerá la calidad de la solución. El segundo problema es como llevar la solución a una metodología que permita tomar decisiones de despacho en tiempo real. Se encontró en la bibliografía que una de las soluciones mas simples a estos problemas es la implementada en [23]. El objetivo del problema de PL planteado es el de maximizar la productividad de una mina. Los únicos datos necesarios son los tiempos de viaje entre los nodos de cada conjunto, los tiempos de servicio en los nodos destino, el tamaño de la flota y el tiempo de simulación. Las incógnitas serán las cuotas de camiones que deben circular entre cada punto de carga y descarga y viceversa. A continuación se detallan las ecuaciones.

$$\text{máx } f = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^P \theta_{ij} \text{ sujeto a} \quad (3.26)$$

$$\sum_{j=1}^P \epsilon_{ij} = \sum_{j=1}^P \theta_{ij} \quad \forall i \quad (3.27)$$

$$\sum_{i=1}^S \epsilon_{ij} = \sum_{i=1}^S \theta_{ij} \quad \forall j \quad (3.28)$$

$$\sum_{i=1}^S \theta_{ij} t_{p_j} \leq T_{ST} \quad \forall j \quad (3.29)$$

$$\sum_{j=1}^P \epsilon_{ij} t_{s_i} \leq T_{ST} \quad \forall i \quad (3.30)$$

$$\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^P \theta_{ij} (t_{p_j} + r_{ij}) + \epsilon_{ij} (t_{s_i} + q_{ij}) \leq NT_{ST}. \quad (3.31)$$

En el problema planteado, θ_{ij} es el número de camiones que deberá viajar entre el punto de carga L_i y el punto de descarga U_j en el tiempo T_{ST} , mientras que ϵ_{ij} es el número de camiones que deben viajar desde el punto de descarga U_j al punto de carga L_i en ese mismo tiempo. El valor de T_{ST} es la longitud de la simulación que se realizará y N es el tamaño de la flota. Los valores de r_{ij} y q_{ij} son los tiempos de viaje entre nodos. La función objetivo a maximizar es la suma de los vehículos enviados a los puntos de descarga, como se describe en la Ecuación (3.26). Las Ecuaciones (3.28) y (3.27) imponen una restricción de continuidad, es decir que el número de vehículos que entra en cada nodo debe ser igual al número de vehículos que sale. Esto es necesario para descartar soluciones donde todos los camiones son enviados continuamente en una sola dirección. Las Ecuaciones (3.30) y (3.29) imponen restricciones temporales. El tiempo que los camiones están en servicio debe ser menor o igual al tiempo total de simulación. La última restricción, representada en la Ecuación (3.31), se asegura de que el tiempo total utilizado en que los camiones viajen o que estén siendo atendidos dividido por el

tamaño de la flota sea menor que el tiempo de simulación. El número de variables es $2SP$ mientras que el número de restricciones es $2(S + P) + 1$.

Una vez establecidas las cuotas, se debe definir como implementar una política de despacho que las haga cumplir. En [23] se propuso hacer una resta entre la cuota calculada y la cuota real. Sin embargo esto es un problema cuando las cuotas poseen magnitudes muy distintas. Supongamos que una de las cuotas entre un nodo de carga A y uno de descarga B es de 50 mientras que la que es necesaria entre A y un nodo de descarga C es de 30. Esto quiere decir que los primeros 21 vehículos que partan de A se enviarán a B antes de que uno solo se envíe a C. Para aliviar este problema se implementó una solución en la cual la diferencia se hace entre las proporciones de vehículos enviados a las proporciones establecidas por las cuotas calculadas. Éstas se calculan dividiendo cada una de las cuotas por el número total de vehículos que deben ser enviados en una dirección, en forma similar a los valores α . Es decir en el caso del ejemplo, si B y C son los únicos nodos de descarga este valor será 80 y las proporciones objetivo será $3/8$ y $5/8$. Esto hará que cada 8 vehículos que viajen del nodo A a los puntos de descarga, 3 irán a C mientras que 5 irán a B.

El problema principal del planteo de PL tal y como se expuso es que no se imponen proporciones de uso mínimas. Esto quiere decir que pueden darse soluciones con cuotas muy bajas o cero, ya que puede ser matemáticamente óptimo no utilizar un camino entre un par de nodos determinado. Esto puede llevar a que uno de los nodos casi no sea utilizado. Además, al igual que las políticas EC MP y MP su desempeño depende de la calidad de los tiempos de viaje calculados.

Capítulo 4

Política de Velocidad

4.1. Nociones básicas

Como se estableció en el Capítulo 1, una de las limitaciones principales de los enfoques en las metodologías modernas de despacho es limitar la capacidad de acción del sistema sólo a seleccionar el destino de un vehículo. Las tecnologías de hoy en día permiten conocer más información que sólo la ubicación de un vehículo. Los trabajos que se han desarrollado en estos últimos años, como por ejemplo [24] y [25], proveen una idea de las capacidades de los sistemas modernos de comunicación y el procesamiento de datos. Estas facilidades son las que motivan la idea de llevar a los sistemas de despacho mas allá de la mera selección de destinos.

Una de las primeras posibilidades que surge es implementar un control de velocidad. La estimación de la velocidad óptima en algún criterio es un desarrollo que es fundamental para llevar adelante una mina que funcione con vehículos autónomos. Pero aunque los mismos sean controlados por humanos, los sistemas de comunicaciones actuales fácilmente pueden enviarle la información de la velocidad preferencial al conductor.

Viajar siempre a la máxima velocidad permitida no necesariamente es la mejor elección. Por un lado podría implicar mayor tiempo de espera para los camiones. Pero por

otro lado también es mayor el consumo de combustible. Como se ve en la Ecuación (2.1), ir a mayor velocidad implica mas consumo tanto por la elevada rapidez, como por el hecho de mantener la aceleración un mayor tiempo. Además de estos factores, la velocidad de los vehículos también tiene una influencia directa en el nivel de seguridad de la mina. Por lo que también es recomendable viajar de forma mas lenta en casos que sea posible por traer mayor seguridad para el personal y el equipamiento. Otro factor importante a considerar es el desgaste de la cubiertas, el cual representa un importante insumo, y la degradación de las mismas depende de la velocidad [26].

A lo largo de este capítulo se desarrollará una nueva metodología que permite calcular la velocidad a la cual deberán viajar los vehículos, de tal forma de reducir los tiempos de espera y la regulación de velocidad cuando dos camiones se acercan demasiado. Es importante aclarar que las ecuaciones, predicciones y algoritmos que se desarrollan a lo largo de este capítulo utilizan el modelo de movimiento ideal representado por la Ecuación (2.3).

Es importante recalcar que el ajuste de velocidades es independiente de la selección de destinos. Es decir que los procedimientos que se establecen en éste capítulo se pueden aplicar a cualquier metodología de despacho.

4.2. Pautas para el ajuste de velocidad.

A pesar de que la velocidad debería ser regulada para disminuir gastos innecesarios, también es verdad que si los vehículos viajan demasiado lento la productividad decaerá significativamente. Esto podría llegar a producir una pérdida en lugar de una ganancia. Por este motivo los camiones que no estén limitados por las intenciones de otros vehículos, deberán ir a la velocidad máxima (V_{ref}).

Para eliminar el tiempo de espera en un nodo destino $z \in \mathbf{Z}$, es necesario contemplar los tiempos de servicio. Si dos camiones h_0 y h_1 se dirigen al mismo destino a través de

un mismo camino (secuencia de nodos), con h_1 siguiendo a h_0 , entonces la velocidad de h_1 se deberá calcular para que llegue a su destino justo cuando h_0 esté terminando su tarea. Esto implica que el tiempo que debe tardar h_1 en llegar a z no deberá ser superior al que necesita h_0 para llegar a z sumado al tiempo de servicio $t_{se}(z)$. Idealmente, si el modelo de movimiento es perfecto, se anularía el tiempo de espera de h_1 y el nodo z no percibiría tiempo de ocio. Sin embargo, en general, esto no sucederá. Si se sobrestima el tiempo que tardará h_0 el nodo z quedará inactivo esperando a h_1 . Si el tiempo es subestimado entonces h_1 deberá esperar.

El tiempo de servicio no es lo único que limita la velocidad a la que puede ir el camión, también lo hace el vehículo que pueda llegar a tener adelante. En el ejemplo anterior, es posible que h_0 estuviese dirigiéndose hacia un destino distinto que h_1 . Si además la velocidad de h_0 se ajusta por que existen uno o mas camiones que llegarán a su destino antes que él, entonces no tendrá sentido que h_1 vaya a la máxima velocidad por que tendrá que regularla al acercarse a h_0 . Esto implica un mayor gasto de combustible por ir a una velocidad mayor a la necesaria y por necesitar regular la aceleración para evitar la colisión.

Estas dos pautas implican que el cálculo de la velocidad de un camión depende de la posición, velocidad y destino de otros camiones en la mina. A este conjunto de datos se lo denomina *estado de la mina*, y debe construirse cada vez que sea necesario estimar o recalcular la velocidad de un vehículo particular.

La Figura 4.1 muestra un esquemático del estado de una mina de seis nodos. Los nodos 1 y 5 son de descarga mientras que el 4 y el 6 son de carga. En la figura se muestra sólo los ocho camiones de la flota que se dirigen a cargar. Cada vehículo tiene asociado un par de números, el primero indica el número de camión (entre 0 y 7) mientras que el segundo indica el destino al que se dirige. También se muestran las situaciones descritas. Por ejemplo, el camión 2 que se dirige al nodo 4 y deberá regular su velocidad por tener en frente al camión 3 el cual se dirige al nodo 6. Es posible que el camión 3 no esté viajando

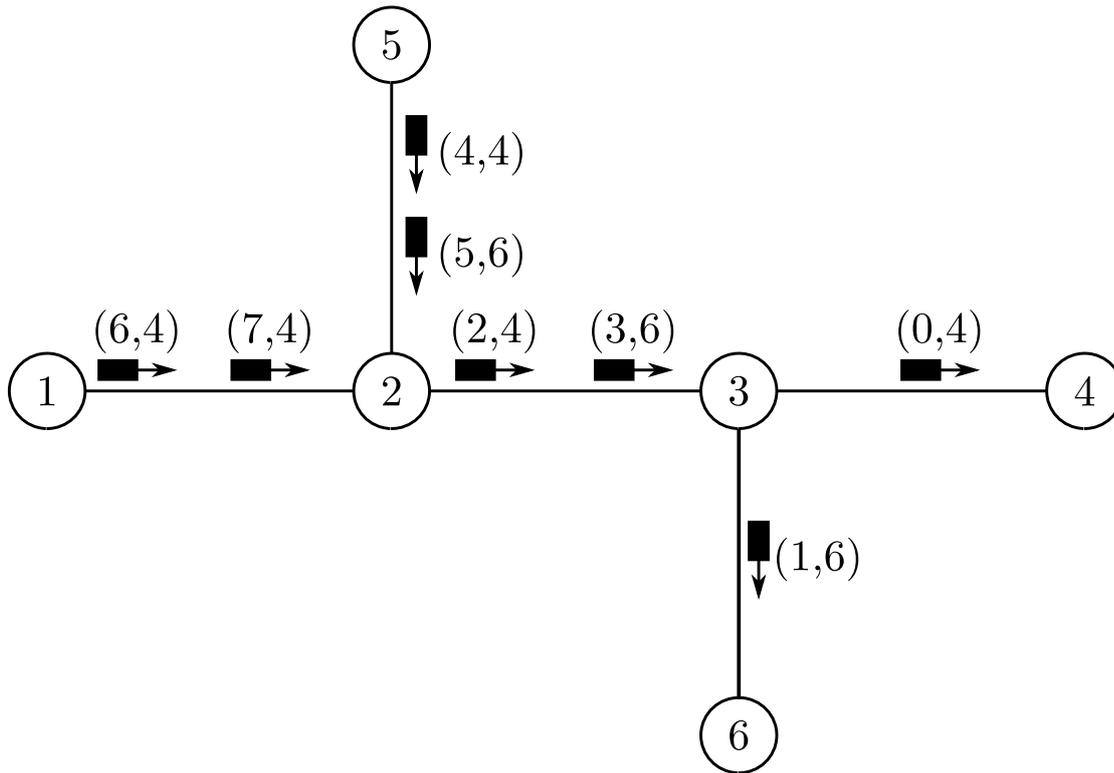


Figura 4.1: Estado de las posiciones de los camiones en una mina. Cada camión tiene asociado un par de números. El primero indica el número de camión mientras que el segundo indica el destino al que se dirige.

a la máxima velocidad por que el camión 1 llegará al destino 6 antes que el 3.

Dadas las incertidumbres del problema es difícil evaluar el orden de llegada de los camiones. En la Figura 4.1, se puede ver claramente que el primer y segundo camión en llegar al nodo 4 serán el 0 y el 2 respectivamente. Sin embargo el orden de llegada de los camiones 4, 6 y 7 no está totalmente determinado. El camión 7 llegará obligatoriamente antes que el 6 ya que ambos recorrerán el mismo camino y el 7 se encuentra mas avanzado. Pero el camión 4 podría llegar antes que el 7, después del 7 y antes que el 6 o después del 6. Esto cambiará la velocidades que es necesario fijarle a los tres camiones y es posible regular las mismas para que el orden de llegada sea el deseado. Esto presupone que las distancias y tiempos hacen que cualquiera de estas tres posibilidades sean posibles. En

esta situación se asume un orden y las velocidades son calculadas teniendo en cuenta ese orden. Si en un momento determinado este orden se hace imposible, entonces las velocidades se recalculan teniendo en cuenta esta información.

Por ejemplo, si se supone que el camión 4 llegará antes que el 7 y existen errores en los cálculos de los tiempos, puede suceder que el camión 7 entre en el arco que lleva del nodo 2 al 3, antes que el camión 4. Por lo tanto el orden supuesto ya no es topológicamente posible. Esto se debe a que los camiones 4 y 7 poseen exactamente el mismo camino y 7 ya está por delante del camión 4. En este caso las velocidades se deben recalcular para tener en cuenta el cambio en la predicción del orden de llegada.

Los ejemplos anteriores establecen que el cálculo correcto de la velocidad dependerá de la predicción del orden en que llegarán los vehículos a un determinado destino. Existen dos tipos de orden: topológico y cronológico. El *orden topológico* resulta de la topología de la mina y es posible aplicarlo a vehículos que se encuentren viajando en la misma secuencia de nodos hacia un mismo destino. En estos casos el primer camión que llegará a destino será el mas cercano y el segundo el que le siga al primero en el camino y así sucesivamente. Esto es una consecuencia directa que los camiones no pueden rebasarse. Si una predicción no conserva este orden la misma se debe modificar y las velocidades se deben recalcular.

El orden cronológico establece que los vehículos deberán llegar a un nodo destino ordenados en su tiempo de viaje de menor a mayor. Esto es natural cuando los vehículos están en el mismo camino ya que la velocidad de un vehículo que no está primero en el orden de llegada topológico siempre se ajustará para llegar al destino cuando el vehículo de enfrente haya terminado su servicio. Sin embargo, la relación entre distancia y velocidad elegida es la que definirá la predicción del orden de llegada de los camiones cuando la topología no lo ha fijado. Este es el caso del camión 4 en el ejemplo de la Figura 4.1.

Es posible, entonces, resumir todos estos conceptos en las siguientes pautas:

1. Si un camión no está limitado por los otros vehículos de la mina, deberá ir a la máxima velocidad.
2. Si un camión posee un vehículo en frente en su mismo camino al mismo destino, entonces este vehículo llegará después que el camión que está por delante y por ende su velocidad deberá ser ajustada para tener en cuenta el tiempo de servicio del nodo destino.
3. Si un camión tiene un vehículo enfrente deberá ajustar su velocidad para mantener una distancia que evite al regulación de la aceleración por proximidad.
4. Para poder cumplir siempre con las pautas 2 y 3, la velocidad para un dado camión deberá ser la mínima de los límites establecidos en ellas.
5. La velocidad de un camión dependerá del estado de la mina la cual definirá el orden topológico y cronológico en el cual llegarán los camiones a un destino determinado. Ambos órdenes deben ser coherentes entre sí para generar una sola predicción del orden de llegada de los vehículos.

Ésta lista se denomina *pautas del ajuste de velocidad*.

4.3. Cálculos de velocidad

En esta sección se desarrollan los algoritmos que estimarán la velocidades a las cuales deberían ir todos los camiones de la mina dado el estado de la misma y siguiendo la pautas de la Sección 4.2.

Para cumplir con la segunda pauta se deberá limitar la velocidad de un camión $h = z_k$ que se dirige a un nodo z al cual llegarán k vehículos antes que él. El límite se establece con respecto al tiempo que requiere el camión que llegará justo antes que h , es decir $h_c = z_{k-1}$. Por lo tanto h deberá recorrer la distancia restante a su destino demorando,

al menos, el tiempo que necesita el camión h_c en terminar el mismo camino sumado al tiempo de servicio del nodo, $t_{se}(z)$.

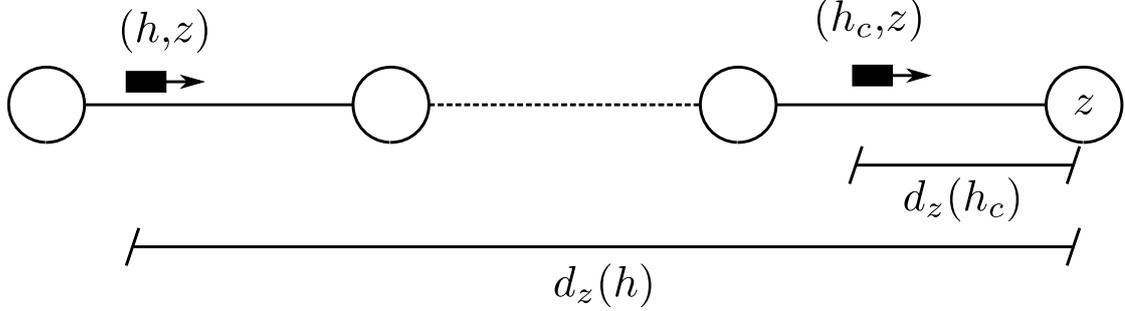


Figura 4.2: Representación esquemática de dos camiones dirigiéndose al mismo destino

La Figura 4.2 muestra un esquemático de la situación descrita. Utilizando el modelo ideal de movimiento, se puede expresar la velocidad máxima deseada para esta situación (V_b) como,

$$V_b = \min \left\{ \frac{d_z(h)}{\frac{d_z(h_c)}{v_{h_c}} + t_{se}(z)}, V_{ref} \right\}, \text{ si } k > 0. \quad (4.1)$$

La expresión de la Ecuación (4.1) utiliza el operador mínimo para garantizar que la velocidad que se calcula no supere la máxima permitida. Si h es el primer vehículo en la predicción del orden de llegada, entonces el único tiempo que limitará su velocidad es el necesario para que terminen todos los vehículos esperando en el nodo z , es decir $E_{wt}(z)$. Por lo tanto, la expresión completa será,

$$V_b = \begin{cases} \min \left\{ \frac{d_z(h)}{\frac{d_z(h_b)}{v_{h_b}} + t_{se}(z)}, V_{ref} \right\} & \text{si } k > 0 \\ \min \left\{ \frac{d_z(h)}{E_{wt}(z)}, V_{ref} \right\} & \text{si } k = 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Para cumplir con la tercer pauta del ajuste de velocidad, se debe limitar la velocidad de un camión h de tal forma que llegue al final del arco que recorre (w) sólo después de

que f_h haya finalizado.

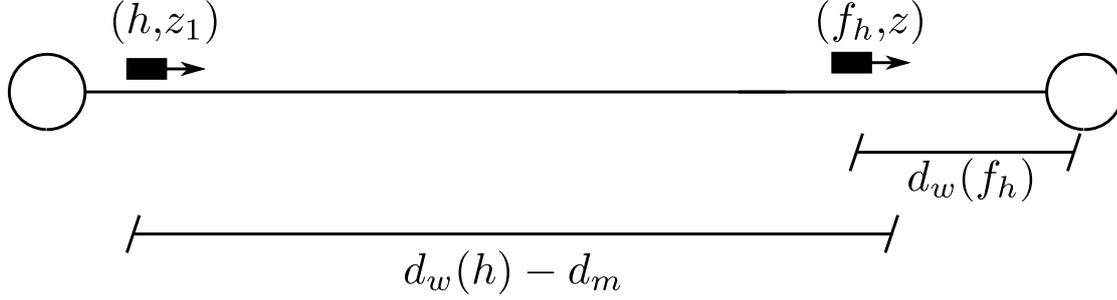


Figura 4.3: Representación esquemática de dos camiones en el mismo arco con distintos destinos.

Esta situación se puede ver representada en la Figura 4.3, en la misma un camión se dirige a $z_1 \in \mathbf{Z}$ y otro a $z \in \mathbf{Z}$, para representar que no es necesario que ambos vehículos estén en camino al mismo destino. Si se calcula la velocidad de h de tal forma que termine su recorrido justo al mismo tiempo que f_h , los camiones se aproximarán mucho y habrá regulación de velocidad por parte de h para evitar colisiones. Por este motivo, la velocidad de h se calcula de tal forma de que llegue al final del arco menos la distancia mínima de seguridad (d_m) en el tiempo que f_h necesita para terminar su recorrido. Ésta velocidad posee la siguiente forma,

$$V_a = \text{mín} \left\{ \frac{(d_w(h) - d_m)v_{f_h}}{d_w(f_h)}, V_{ref} \right\}.$$

En el caso de que la distancia al final del camino sea menor que d_m , el límite no tiene sentido por que h ya está demasiado cerca a f_h . En el caso de que h sea un camión líder, el límite será directamente V_{ref} . Por lo tanto la expresión completa de la velocidad limitante tiene la forma

$$V_a = \begin{cases} \text{mín} \left\{ \frac{(d_w(h) - d_m)v_{f_h}}{d_w(f_h)}, V_{ref} \right\} & \text{si } f_h > -1 \\ V_{ref} & \text{si } f_h = -1 \end{cases} \quad (4.3)$$

Nuevamente, la Ecuación (4.3) utiliza el operador mínimo para que la velocidad no sea mayor que la máxima permitida, lo cual puede suceder si f_h está próximo al final del arco mientras que h se encuentra cerca del comienzo.

Las Ecuaciones (4.1) y (4.3) establecen límites superiores para las velocidades. Por lo tanto la verdadera velocidad de un camión h estará dada por el mínimo entre V_b y V_a , que es la conclusión de la cuarta pauta del ajuste de velocidad. La primer pauta es automáticamente satisfecha por el uso del operador mínimo en ambas expresiones ya que se asegurará de que un vehículo viaje a la máxima velocidad si la aplicación de las pautas 2 y 3 no son limitantes.

Cuando se calcula v_h , de existir un camión detrás de h en el mismo arco w y/o un camión que se predice que llegará después de h a z (z_{k+1}), sus velocidades deberán ser recalculadas ya que dependerán de v_h . Lo que es mas, los cálculos dependen de que la predicción del orden de llegada al nodo z sea coherente con los tiempos calculados y las posiciones de los vehículos. Por lo tanto, el proceso del cálculo de velocidades de todos los camiones de la mina, dado el estado de la misma, es un proceso iterativo.

El Algoritmo 4.1 muestra el proceso completo para el cálculo de las velocidades de todos los camiones de la mina. Cada vez que se requiere actualizar la velocidad de un vehículo lo primero que se hace es un ordenamiento topológico. Este algoritmo ordena la lista del orden de llegada de los vehículos a cada nodo destino teniendo en cuenta sólo la ubicación de los mismos. El ordenamiento se hace sólo sobre vehículos que estén recorriendo exactamente la misma secuencia de nodos. Por lo tanto si dos vehículos se encuentran en esta situación, el algoritmo se asegura de que el camión que tenga un índice menor en esta lista esté, efectivamente, a una menor distancia del destino. Esto surge de que los vehículos no se pueden rebasar y por ende vehículos mas adelantados en un mismo camino llegarán inevitablemente primero al destino. Si la secuencia de nodos no es exactamente la misma, no se puede saber de forma certera cual llegará primero y por ende en estos casos no se realizan modificaciones. Este es el caso del camión 4 con

Algoritmo 4.1 Cálculo de velocidades dado un estado de mina

1. Realizar un ordenamiento topológico, de ser necesario.
 2. $v_h = V_{ref}$, $0 \leq h \leq N - 1$
 3. Fin = Verdad.
 4. Para todos los camiones h
 - a) Se calcula V_a utilizando la Ecuación (4.3)
 - b) Se calcula V_b utilizando la Ecuación (4.2)
 - c) $v_b = v_h$
 - d) $v_h = \max\{\min\{V_a, V_b\}, V_{min}\}$
 - e) $\Delta = \frac{|v_b - v_h|}{\max\{v_b, v_h\}}$
 - f) Fin = [Fin AND ($\Delta < Tol$)].
 5. Si Fin = Verdad, pasar a 4, de lo contrario pasar a 3.
 6. Realizar un ordenamiento cronológico. Si hubo un cambio volver a 2. De lo contrario finalizar.
-

respecto a 6 y 7 en la Figura 4.1. El ordenamiento topológico se ejecuta cada vez que algún vehículo se ingrese a un arco o llegue a su destino.

A continuación, se procede a calcular la velocidad de cada uno de los camiones de la mina. Este proceso comienza con la inicialización de las velocidades en su valor máximo. Luego se utilizan las Ecuaciones (4.3) y (4.2) para calcular los límites debido a vehículos en el mismo arco (V_a) y debido al orden de llegada que se prevea para cada camión (V_b). La nueva velocidad (v_h) será el mínimo entre V_a y V_b . El algoritmo también posee un parámetro de entrada opcional que es la velocidad mínima aceptable (V_{min}). Se utiliza para prevenir la asignación de velocidades demasiado pequeñas, utilizando el operador máximo en la asignación de v_h .

Una vez que las velocidades de todos los vehículos fueron calculadas, es muy probable, que la de ciertos vehículos deban ser recalculadas. Por lo tanto, para saber cuando es necesario finalizar el proceso iterativo se mide el cambio porcentual de cada velocidad v_h con su valor de la iteración anterior. En el Algoritmo 4.1 el valor anterior de la velocidad de un dado camión se nota v_b mientras que su cambio porcentual es notado como Δ . Si los valores de Δ para las velocidades de todos los vehículos caen por debajo de una cierta tolerancia (Tol), la cual es un parámetro del algoritmo, entonces no es necesario volver a iterar.

Una vez que las velocidades fueron calculadas, se realiza un ordenamiento cronológico. El algoritmo realiza un barrido de todas las listas que predicen el orden de llegada de los vehículos y debe verificarse que un vehículo que llegará en lugar k -ésimo a un dado nodo, posea un menor tiempo de viaje que el vehículo que llegará después de él. Los tiempos de viaje son calculados como la distancia que le falta recorrer a cada vehículo para llegar a su destino dividido la velocidad que se le asignó. Si este orden no se verifica para algún par de vehículos entonces el orden de llegada no es correcto. Se realiza el intercambio en la lista y se vuelven a recalcular todas las velocidades (paso 2 del Algoritmo 4.1). Esto se debe a que el cambio altera las dependencias con las que

se calculan los valores de V_a y V_b . Es importante destacar que la situación en la que es necesario realizar un intercambio sólo sucederá en vehículos que no puedan ser ordenados topológicamente. Esto se debe a que el ordenamiento topológico y la forma de calcular las velocidades garantizan que los vehículos que están ordenados topológicamente están, además, ordenados cronológicamente. Si el algoritmo de ordenamiento cronológico no realiza ningún cambio entonces el algoritmo terminó.

El cálculo de velocidades sólo se realiza para vehículos que están en movimiento y no contempla vehículos que estén en colas en los nodos. Además solo es necesario cuando un camión ingresa al comienzo de un arco. Esto sucederá cuando termina el recorrido de un arco anterior o cuando termina su tarea en un nodo destino. En este último caso es necesario asignarle por primera vez la velocidad al camión que terminó su tarea. Además el vehículo debe ser agregado en la lista correspondiente de orden de llegada. Por convención, los vehículos que emprenden su viaje a un nuevo destino son agregados últimos en la lista. Los algoritmos de ordenamiento se encargarán de corregir esta posición si es posible que el vehículo llegue al destino antes que alguno de los que ya se encontraban en ella. A su vez un camión que llega a su destino asignado se elimina de la lista de predicciones.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Parámetros generales de simulación

El objetivo principal del presente trabajo de tesis es lograr un avance en el estado del arte en las metodologías de despacho. Para ello, en el Capítulo 3 se han desarrollado dos técnicas nuevas que permiten elegir los destinos en base a una secuencia fija de despacho. Las técnicas varían en la forma en la que se calcula la secuencia. En un caso se intenta maximizar la productividad, mientras que en el otro se intenta minimizar tiempos de ocio de los nodos. Por otro lado, en el Capítulo 4, se mostró una nueva forma de calcular las velocidades objetivo que deberán llevar los vehículos para eliminar el tiempo de espera de los mismos, ahorrar combustible y aumentar el nivel de seguridad. Para poder medir los efectos de estas técnicas sobre una operación minera se implementó un simulador que utiliza un modelo de movimiento de los camiones que utiliza poco datos, es rápido de evaluar y permite tener en cuenta los efectos de la actitud de manejo de los conductores.

En este capítulo se mostrarán un conjunto de experiencias que servirán para validar las propuestas de este trabajo. La primera parte muestra la calidad del modelo para el movimiento de camiones expuesto en el Capítulo 2. Aquí se mostrará el comportamiento antes diversas situaciones y se hará una comparación de los datos obtenidos en simu-

lación con los datos de un camión real, obtenidos a partir de mediciones de GPS. La segunda parte del capítulo mostrará el desempeño de las técnicas de despacho desarrolladas (Secciones 3.5.1 y 3.5.2) en contraste con las metodologías de referencia (Sección 3.6) en varias minas de distinto tamaño y con distintos tamaños de flota.

Para todas las simulaciones, a menos que se aclare lo contrario se utilizaron flotas compuestas por camiones Komatsu 960E [27]. Los datos requeridos por el modelo de movimiento se encuentran en la Tabla 5.1.

Parámetro	Valor
Masa (M_u-M_l)	235481-555481 kg
Potencia (P_p-P_b)	2495-4476 kW
Fuerza máxima ($F_{pmax}-F_{bmax}$)	1255,68-647,46 kN
Longitud	15,6 m

Tabla 5.1: Parámetros para la simulación de un camión Komatsu 960E.

A continuación se presenta una tabla que provee los valores de los parámetros utilizados en todos los algoritmos presentados.

Parámetro	Valor	Unidades	Sección
Δt	1	s	Sección 2.1
V_{ref}	40	km/hr	Definición 2.19
T_c	30	s	Definición 2.19
a_{max}	2	m/s ²	Sección 2.4.2.3
tol	0.1	-	Sección 2.4.2.1
β_0	1	ml/s	Sección 2.2
β_1	5×10^{-5}	ml/kJ	Sección 2.2
β_2	5×10^{-7}	ml/(kJ.m/s ²)	Sección 2.2
T_{ST}	8	hr	Definición 2.9
DCM_{max}	2	-	Sección 3.5.1
Tol	0.01	-	Sección 4.3
V_{min}	0 ó 20	km/hr	Sección 4.3

Tabla 5.2: Parámetros generales de simulación, incluyendo la referencia de la sección o definición en donde se presentan y explican.

La Tabla 5.2 también muestra la referencia a la sección donde se definen los parámetros y en que algoritmos se utilizan.

5.2. Desempeño del modelo

Esta sección mostrará los resultados de experiencias realizadas para validar el modelo de movimiento no ideal de los vehículos en conjunto con los algoritmos de comportamiento. La primer experiencia permite ver las curvas individuales de posición y velocidad para cinco vehículos que forman una caravana y se desplazan del comienzo al fin de un arco. La segunda experiencia realiza un conjunto de simulaciones en las cuales se registra la máxima aceleración de frenado para poder verificar que la misma se mantenga dentro de límites razonables en una gran cantidad de situaciones. Finalmente se compara la simulación de un vehículo particular con los datos de velocidad que son obtenidos por medio de GPS de un vehículo real.

5.2.1. Experiencia 1: Simulación de caravana en peor caso

La primera experiencia consistió en crear una caravana de 5 vehículos que se inicializaron con una separación despreciable y en condiciones de reposo. Las masas utilizadas son las que poseen cuando están cargados. El camino en sí, se fijó de 1 km de longitud y una pendiente de 4%. Los parámetros T_c de los conductores se fijaron en 30, 32, 35, 38 y 40 segundos, donde el primer valor es correspondiente al vehículo más próximo al fin del camino y el último corresponde al vehículo al final de la caravana. Finalmente, las velocidades objetivo se designaron como 30, 33, 35, 37 y 40 km/hr. Los demás parámetros son los que se muestran en la Tabla 5.2. El objetivo del experimento es evaluar el desempeño de los vehículos cuando se desplazan hacia el fin del camino. Cuando un camión termina su recorrido, se quita de la simulación haciendo que el vehículo que lo sigue comience a comportarse como líder.

La idea de esta experiencia es mostrar un peor caso de condiciones iniciales y de actitudes de los conductores. La separación inicial es mínima, por lo que el movimiento tendrá que ser muy cuidadoso al principio para no ocasionar una colisión. Además de esto,

cada camión siempre tiene adelante un conductor que desea ir mas lento y, además, debe llegar a su velocidad con menor aceleración. Esto se ve en el hecho de que las velocidades de crucero y los T_c son valores progresivamente más altos, en orden de primer vehículo al último de la caravana.

La Figura 5.1 muestra el progreso de la posición de los camiones, mientras que la Figura 5.2 muestra sus curvas de velocidad a lo largo de la experiencia.

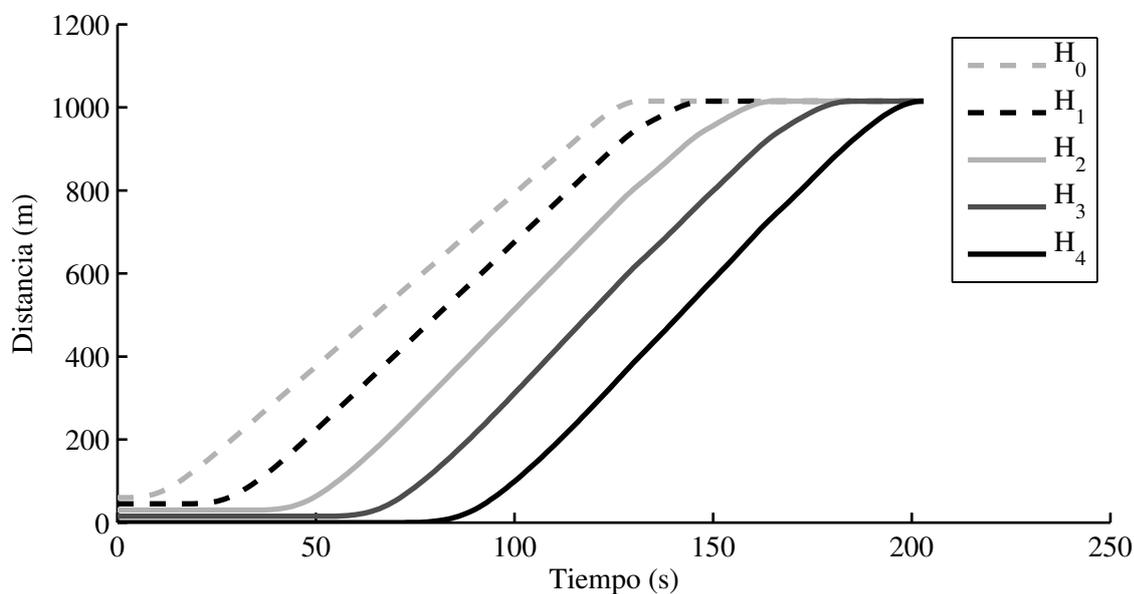


Figura 5.1: Curvas de posición para los 5 vehículos de la Experiencia 1, en función del tiempo. Es posible, como los vehículos mantienen bien la distancia entre ellos, a pesar de condiciones iniciales desfavorables.

El primer vehículo (H_0) logra que su curva de velocidad sea muy similar a la curva objetivo, mostrada en la Figura 2.2.

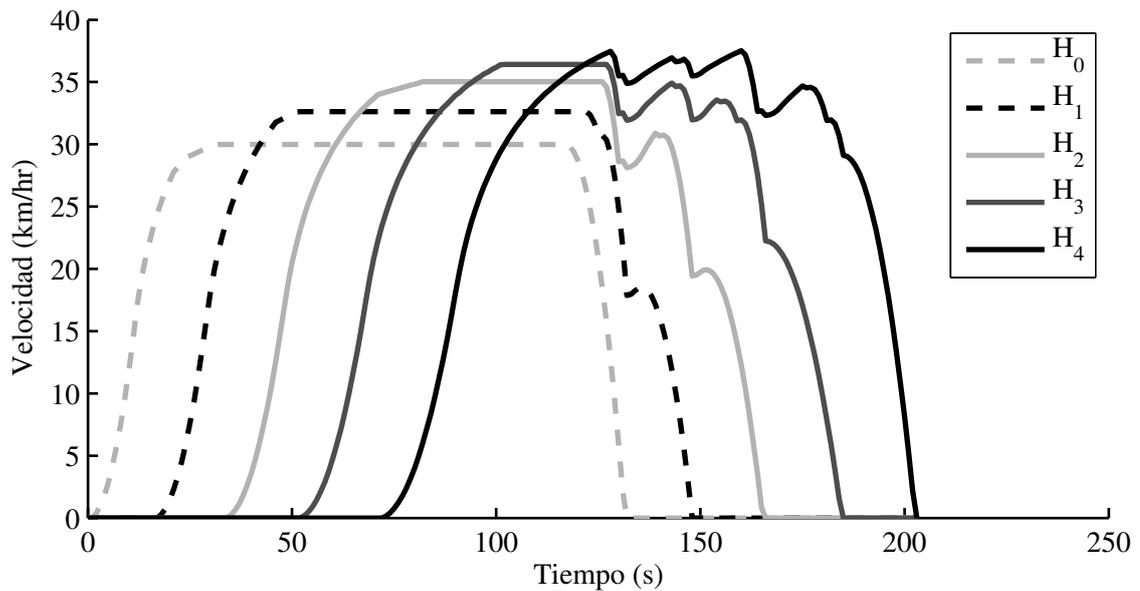


Figura 5.2: Perfiles de velocidad para una caravana de 5 vehículos moviéndose en un camino inclinado. Los vehículos más adelantados se mueven de forma independiente de los demás formando una curva de velocidad similar a la deseada que se muestra en la Figura 2.2. Los últimos 3 camiones deben regular su velocidad para no colisionar y logran hacer esto mostrando un comportamiento razonable. Cuando no hay peligro de colisión, entonces intentan que su perfil de velocidad también se asemeje al deseado.

La forma no es completamente simétrica por que el vehículo frenará con la primera pendiente que calcule que sea mayor que la pendiente que tiene por defecto, de acuerdo a lo expuesto en la Sección 2.4.2.1. Dada la velocidad de cruceo de H_0 de 30 km/hr y su T_c de 30 segundos, le debería haber llevado 22,5 segundos de acuerdo a la Ecuación (2.19), llegar a su velocidad objetivo. Se puede ver que en este tiempo el vehículo ya tenía una velocidad de 28 km/hr, aproximadamente la cual está dentro de la tolerancia del 10%. Lo que es más, velocidad continúa creciendo y luego se vuelve constante en un valor aún más próximo al objetivo.

La Figura 5.2 muestra que el resto de los vehículos de la caravana se comporta en forma razonable, reaccionando bien a los cambios del vehículo en frente y pasando de forma natural a comportamiento de líder cuando su turno llega. No hay cambios de

velocidades abruptos, ni tampoco se detienen totalmente, en ningún momento, logrando así todos los objetivos establecidos.

5.2.2. Experiencia 2: Aceleraciones razonables.

La segunda experiencia fue diseñada para comprobar la robustez de los algoritmos de comportamiento, sobre todo de los camiones seguidores. El objetivo de cada ensayo fue llevar una caravana de cuatro camiones desde una posición inicial aleatoria hasta el final de un camino de distancia y longitud variable. Al comienzo de cada ensayo las condiciones iniciales se fijaron aleatoriamente a partir de muestras de distribuciones de probabilidad uniforme. Las velocidades objetivo de los vehículos se fijaron en valores que variaban entre 27 y 45 km/hr, mientras que la velocidad inicial tuvo valores entre 25 y 35 km/hr. El T_c de los conductores fue fijado en valores que variaron entre 25 y 45 segundos. La pendiente del camino osciló entre -5 % y 5 %.

Se debió tener especial cuidado al fijar las posiciones iniciales de forma aleatoria. Para empezar, el primer camión de la caravana debería tener una posición mas adelantada, que el segundo y el segundo que el tercero y así sucesivamente. Además se fijó una distancia mínima inicial de 20 metros debido a la variedad de condiciones en las que se podía encontrar los vehículos al empezar. La longitud del camino en sí podía tomar un valor mínimo de 284,8 m y su valor máximo fue de 2848m. El valor mínimo se obtuvo multiplicando por cuatro la distancia mínima sumada a la longitud de un camión $((15,6m + 20m)*4 = 142,4m)$ y luego duplicando ese valor, para asegurarse de que los vehículos tuvieran que recorrer alguna longitud de camino en todos los casos. El valor máximo se tomó como diez veces el mínimo. El estado de carga de los camiones también fue elegido aleatoriamente.

Como las principales dificultades del comportamiento se presentan en el frenado, se tomó como valor representativo de un ensayo, la mínima aceleración registrada durante el mismo, por cualquiera de los vehículos. La Figura 5.3 muestra los resultados de realizar

10.000 ensayos, en la forma de un histograma.

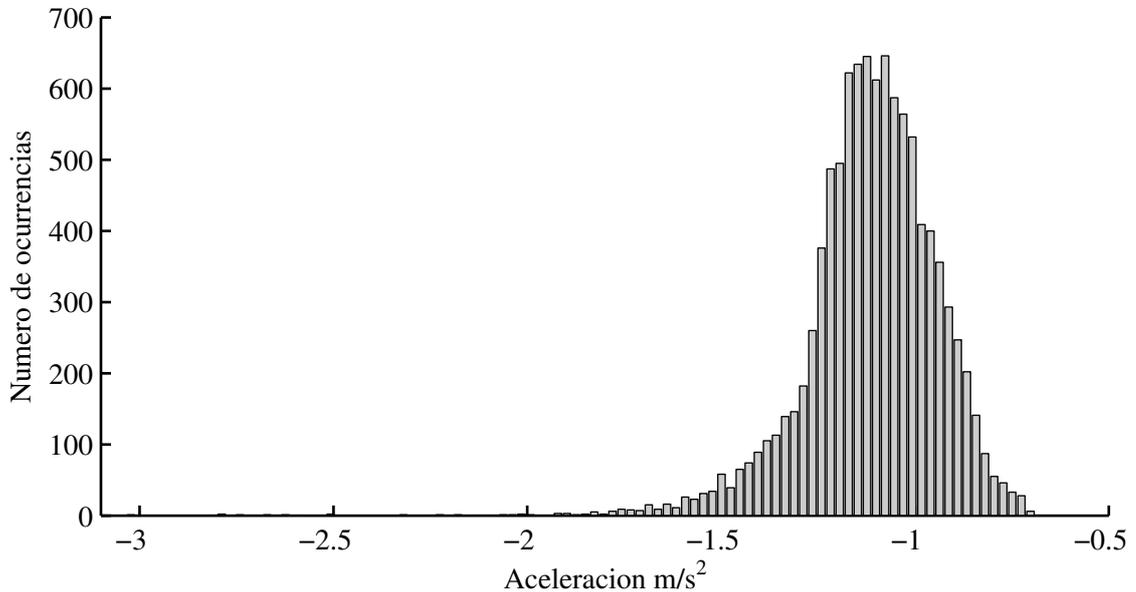


Figura 5.3: Resultado del experimento en el cual se simula una caravana en una gran variedad de condiciones iniciales. El resultado de cada simulación es la máxima desaceleración registrada. El histograma muestra los datos de 10000 simulaciones. Los resultados muestran claramente que para resolver la mayoría de las situaciones que se plantean los algoritmos de comportamiento no necesitan utilizar desaceleraciones extremas, es decir mayores a -2 m/s^2 .

La media de los datos es de $-1,11 \text{ m/s}^2$, mientras que la varianza es de $0,0293$. Sólo 15 ensayos tuvieron deceleraciones mayores, en magnitud, a los 2 m/s^2 establecido como el límite aceptable. El análisis de estos casos reveló que estos eventos sucedieron en situaciones extremas con vehículos comenzando a altas velocidades muy próximos al fin del camino. Otra posibilidad era la inicialización del vehículo a alta velocidad detrás y muy próximo a otro vehículo moviéndose muy lentamente. En general, esta experiencia demuestra la robustez de los algoritmos ante una variedad de situaciones, lo cual era uno de los objetivos originales.

5.2.3. Experiencia 3: Comparación con datos reales

Los modelos de vehículos y algoritmos de comportamiento se desarrollaron para formar parte de un marco de referencia que permitiera la comparación de distintas técnicas de despacho. Por lo tanto, no fue el objetivo la reproducción realista del comportamiento de un vehículo. Por ejemplo, la restricción de hacer que los camiones lleguen con velocidad exactamente cero al fin de un arco es muy importante. En la realidad esto no es necesariamente así.

Aún así, a efectos de verificar cuanto difiere un comportamiento simulado de uno real, se compararon los resultados que generaron los algoritmos de un vehículo líder, para un camión Liebherr T282b en movimiento con los datos de velocidad recopilados por medio de GPS. Los datos se tomaron cuando el vehículo se encontraba moviéndose en un camino de una mina real. A partir de ellos se estimó que el camino poseía una pendiente de 4,4% . El vehículo estaba cargado con lo que su masa se consideró 592.000 kg, mientras que su potencia de propulsión y frenado se tomó de 2722 y 4480 KW, de acuerdo a su hoja de datos. Además, de allí se obtuvieron las fuerzas de propulsión y frenado máxima , 850 y 710 kN respectivamente.

A los datos sin procesar (curva gris claro en la Figura 5.4) se les ajustó un polinomio de orden seis para generar una curva suave con la cual contrastar los resultados de la simulación. De la curva ajustada se estimó un T_c del conductor de 100 segundos con una velocidad de referencia V_{ref} de 40 km/hr y una velocidad objetivo de 25 km/hr. El resultado de la simulación, que es la curva negra en la Figura 5.4, se ajusta razonablemente bien los datos. El comportamiento que se desea reproducir es por lo tanto suficientemente cercano a la realidad, para lograr los objetivos que se establecieron.

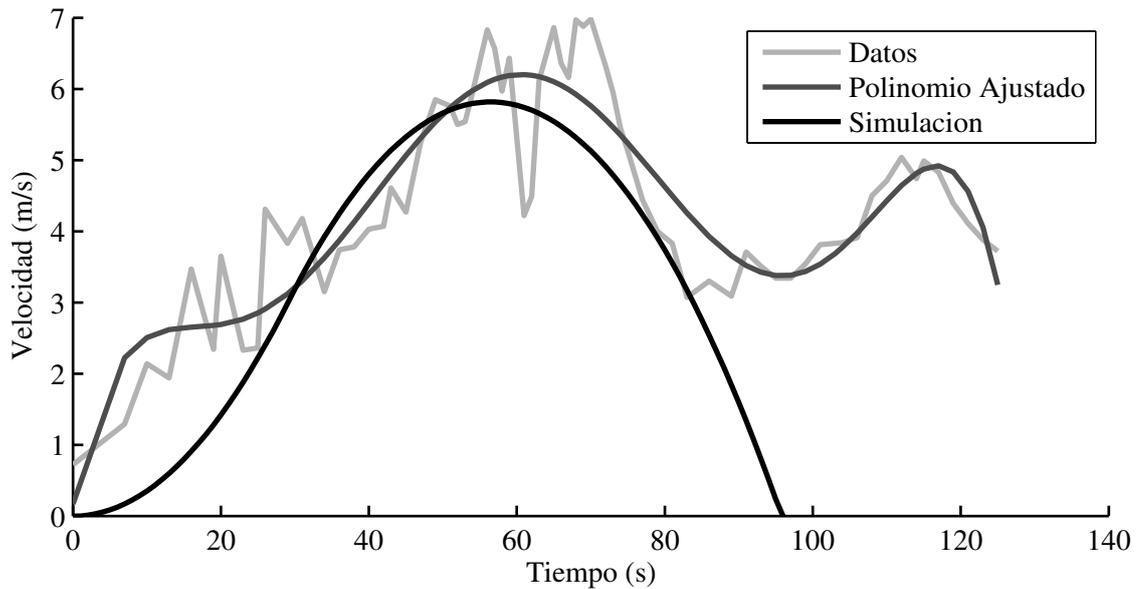


Figura 5.4: Comparación del perfil de velocidad obtenido por simulación y el perfil obtenido de los datos reales de velocidad de un camión Liebherr T282b. La curva de datos reales se muestra luego de ajustar un polinomio de grado 6, que permite ver las tendencias. Para los objetivos establecidos del modelo, se puede concluir que las curvas son lo suficientemente similares.

5.3. Desempeño de técnicas de despacho

En el Capítulo 3 se presentó una nueva metodología de selección de destinos basada en las propiedades de utilizar una secuencia de despacho fija. Este desarrollo presenta beneficios complementarios a los que se perciben de utilizar las técnicas de ajuste de velocidad presentadas en el Capítulo 4. Por este mismo motivo las dos técnicas se unieron para formar dos políticas de despacho que utilizan secuencias fijas y ajuste de velocidad, siendo su única diferencia la forma del cálculo de la secuencias utilizadas. La política MP define la secuencia de despacho con la metodología de la Sección 3.5.1, mientras que la MI la calcula con la técnica presentada en la Sección 3.5.2. El ajuste de velocidad en estos casos utiliza $V_{min} = 0$. Esto quiere decir que la velocidad objetivo de un camión puede hacerse tan pequeña como sea necesario, para que no tenga que esperar al llegar a su destino. Obviamente, velocidades exactamente nulas no son utilizadas. Cuando la

velocidad sí se limita, para que la misma no pueda caer por debajo de los 20 km/hr (es decir $V_{min} = 20$ km/hr), entonces a esta versión de los algoritmos se las denomina MP20 o MI20.

A lo largo de esta sección, se harán referencias a todas las políticas utilizando sólo su identificador de dos letras. A continuación se detallan las abreviaciones:

1. MP es la política de utilizar una secuencia fija de despacho que maximice la productividad (Sección 3.5.1).
2. MI es la política de utilizar una secuencia fija de despacho que minimice los tiempos de ocio de los nodos (Sección 3.5.2).
3. PL es la utilización de programación lineal para encontrar las cuotas de camiones que deben ir entre dos destinos (Sección 3.6.3).
4. EC es la heurística de minimizar el tiempo de espera de un camión (Sección 3.6.1)
5. CM es la heurística de enviar un camión a la que se espera que será la cola mas corta (Sección 3.6.2).
6. MP20 o MI20 son las políticas MP y MI respectivamente cuando la velocidad mínima de cruce que puede asignar la política de velocidad (V_{min} en la Tabla 5.2) se fija en 20 km/hr.

Como las políticas de referencia no implementan ninguna metodología de ajuste de rapidez, la velocidad objetivo que se le asignará a los vehículos será siempre la máxima, es decir V_{ref} . Además, las técnicas MP, PL y EC requieren utilizar los tiempos de viaje entre cada par de nodos carga/descarga. En todos los casos, los valores de r_{ij} y q_{ij} fueron calculados tomando el camino mas corto entre un par de nodos y dividiendo el valor por la velocidad máxima (V_{ref}).

Los resultados de cada ejemplo se exponen en dos partes. Una de ellas es una tabla con los valores de los índices de desempeño logrados para una mina determinada con

tres tamaños de flota (N) distintos. La segunda parte es una comparación gráfica de los resultados de todas las políticas presentadas para los tres tamaños de flota elegidos. La comparación se realiza calculando el APR/RPR (Definición 2.14) para cada política y tamaño de flota, presentado los resultados en un gráfico de barras.

Además de estos datos, en cada ejemplo se presenta una tabla detallando la solución a partir de la cual se arma la secuencia de despacho (vectores \mathbf{X} e \mathbf{Y}) utilizando la técnica de MP y lo mismo para la técnica de MI. El resultado de MP depende del tamaño de flota por lo cual se presenta el resultado correspondiente a cada uno de los tamaños elegidos. Para la técnica MI el resultado depende exclusivamente de los tiempos de servicios por lo que hay uno solo por mina ejemplo. Además se incluyen la predicción de la productividad y el tiempo de ocio total que para compararlos con los obtenidos luego de la simulación.

Los resultados están fuertemente vinculados a la relación entre el tamaño de la mina y el tamaño de la flota. Si el número de vehículos es demasiado pequeño, los nodos de carga y descarga serán visitados de forma infrecuente, por lo que una ligera predilección de la técnica por un par de nodos de carga/descarga que se encuentran próximos (en distancia) puede aumentar la productividad, a costa de que otro grupo de nodos sea poco usado. Además, los camiones prácticamente no tendrán que esperar mientras que el tiempo de ocio acumulado será grande. Cuando el tamaño de la flota es muy grande cada nodo percibirá un flujo de vehículos casi continuo, haciendo que los tiempos de espera de los vehículos sea grande y el tiempo de ocio se muy pequeño. En este caso se dice que la mina está saturada. Lo ideal es tener un tamaño de flota tal que agregar un camión más no aumente la productividad, es decir al borde de la saturación. Los tamaños de flota elegidos para cada ejemplo se eligen de tal forma que estén próximos a este valor.

Los datos de distancia, pendiente y tiempos que definen a una mina se encuentran en el Apéndice E.

5.3.1. Mina Ejemplo 1

Los datos de esta mina están basados de los valores presentados en [16]. La comparación gráfica de los índices de desempeño se pueden ver en la Figura 5.5 mientras que los valores absolutos se presentan en la Tabla 5.3.

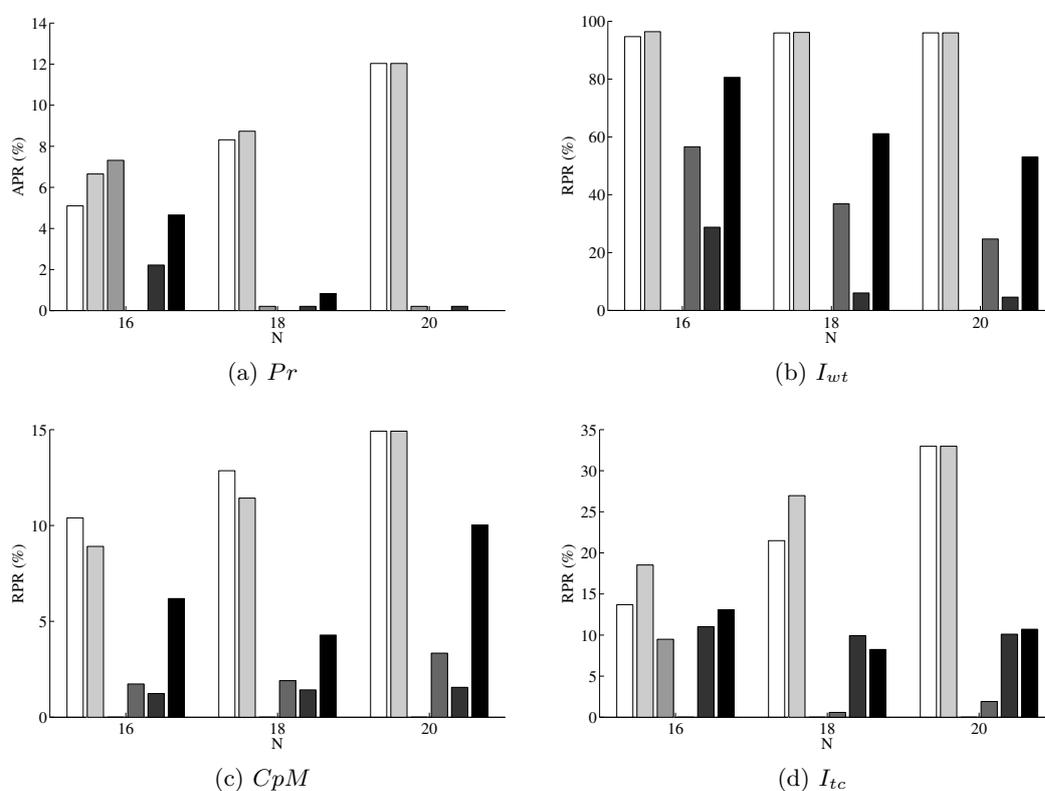


Figura 5.5: Resultados del APR (Definición 2.14) de Pr (a) y del RPR del I_{tw} (b), CpM (c) e I_{tc} (d) para cada una de las políticas utilizadas en la mina ejemplo 1. La comparación muestra una mejora importante de los métodos propuestos MP y MI con respecto de las demás políticas en todos los índices de desempeño, mostrando la efectividad de las técnicas propuestas.

MP MI PL EC CM MP20

Metodología	N		
	16	18	20
MP	474	521	540
MI	481	523	540
PL	484	482	483
EC	451	481	482
CM	461	482	483
MP20	472	485	482

(a) Pr

Metodología	N		
	16	18	20
MP	1.3	1.18	1.78
MI	0.88	1.13	1.78
PL	24.44	29.32	44.44
EC	10.61	18.51	33.46
CM	17.41	27.55	42.4
MP20	4.74	11.4	20.85

(b) I_{wt} en horas

Metodología	N		
	16	18	20
MP	3.62	3.66	3.82
MI	3.68	3.72	3.82
PL	4.04	4.2	4.49
EC	3.97	4.12	4.34
CM	3.99	4.14	4.42
MP20	3.79	4.02	4.04

(c) CpM en litros

Metodología	N		
	16	18	20
MP	16.34	13.50	11.43
MI	15.42	12.56	11.43
PL	17.13	17.19	17.06
EC	18.93	17.10	16.73
CM	16.84	15.49	15.33
MP20	16.45	15.78	15.23

(d) I_{tc} en horas

Tabla 5.3: Resultados de los índices de desempeño para cada política en la mina 3.

Los tamaños de flota elegidos para este caso fueron de 16, 18 y 20 camiones. El valor de 18 fue calculado como el tamaño de flota óptimo en [16]. En general, es posible ver un desempeño superior en el Pr , el I_{wt} y en el CpM para las políticas MP y MI. De éstas dos es un poco mejor el desempeño de MI ya que aumenta la productividad para los tamaños de flota menores. Además, al tener mayor productividad el tiempo acumulado de ocio es también reducido. Esto implica que se logró mejorar, con respecto a las políticas de referencias, los cuatro índices de desempeño: se aumentó el número de descargas de vehículos en una ventana de tiempo, se disminuyó el tiempo de espera de los camiones, el consumo proporcional de combustible, y el tiempo en el que los puntos de carga y descarga no son utilizados.

Con 16 camiones la política PL obtiene la mejor de las productividades, sin embargo esto se logra utilizando el nodo L_4 solamente un 3.8% del tiempo de simulación de 8

horas. Esto este fenómeno fue previsto en la Sección 3.6.3. En cambio la política MP tiene como menor valor de uso al nodo L_3 con un 37,6% del tiempo mientras que la política MI tiene como menor valor un uso del 52.71% del tiempo al nodo L_2 .

Es posible que dos políticas tengan la misma productividad y distintos tiempos de ocio. Esto se puede ver claramente con una flota de 20 camiones para las metodologías PL y CM. La productividad es de 483 descargas y sin embargo CM posee un menor I_{tc} . Esto se debe a que el I_{tc} suma de forma equitativa todo el tiempo en que los nodos están sin atender a algún vehículo. Por lo que al enviar una mayor cantidad de camiones a un punto de carga por sobre otro, el valor final del I_{tc} puede aumentar aunque el número de descargas sea el mismo. En el caso de PL, uno de los nodos de carga fue utilizado muy esporádicamente, pero al ser la flota tan grande se logra la misma productividad que CM. Este fenómeno dependerá de las relaciones de distancias y tiempos de espera. Pero es ese mismo desbalance el que generalmente produce un aumento de la productividad. Las soluciones de los métodos MP y MI imponen justamente las proporciones con las que se deben visitar los nodos. Es por eso que estas soluciones del MP funcionan de forma óptima cuando el número de camiones es grande, ya que de lo contrario los desbalances que generan harían que uno o más de los nodos sean muy poco utilizados. Aún así, la metodología de MI tiende naturalmente a encontrar soluciones más balanceadas que MP.

La Tabla 5.4 muestra los resultados de los algoritmos propuestos. Para 16 y 18 camiones se nota una preferencia por el segundo punto de carga en las soluciones de MP, ya que será el que tendrá la proporción mas grande de vehículos enviados.

	N = 16	N = 18	N = 20
X	{3 4 2 2}	{3 4 3 2}	{1 1 1 1}
Y	{4 4}	{4 4}	{1 1}
P_p	569.2	632.6	640
I_{t_p}	10.31	6.497	5.16

(a) MP

X	Y	P_p	I_{t_p}
{1 1 1 1}	{1 1}	640	5.16

(b) MI

Tabla 5.4: Soluciones y predicciones de los métodos MP y MI para la mina ejemplo 1.

La metodología de MI evaluó como mejor solución a la estándar. Claramente, las predicciones de tiempo de espera y de productividad tienen un error considerable. Esto es esperable por dos motivos. El primero es que el modelo utilizado es una aproximación simplista del comportamiento de la flota de vehículos en la mina. El segundo es que los tiempos de viaje son estimados de una forma muy simple lo que hace que se incremente el error del modelo. A pesar de estos detalles el objetivo del modelo es que permita evaluar cuando una solución es mejor que otra. Esto se ha logrado, ya que las soluciones encontradas son buenas mostrando un excelente desempeño en comparación a las otras políticas.

Un resultado muy importante es que el ajuste de velocidad es un factor crucial en la ganancia de la productividad, lo cual en principio no es intuitivo. Esto se evidencia en la caída del desempeño que tiene la política MP cuando se limita la velocidad mínima que se puede asignar a un camión a 20 km/hr. Además la mejora del I_{wt} también se ve reducida y esto es más notable conforme la flota se hace más grande. Esto es lógico ya que al limitar la velocidad mínima será común el caso donde un camión deberá tener que esperar en una cola. También el ahorro en el consumo de combustible no es tan grande como el que se logra con MP, lo que se explica al aumentar la regulación de velocidad y el movimiento de los vehículos en colas.

Es claro que los beneficios del ajuste de velocidad dependen en gran medida al uso de velocidades objetivos menores a 20 km/hr. Si bien esto es un problema con conductores humanos, no así en el caso de una mina automatizada y las ventajas son substanciales.

En los siguientes ejemplos se buscará reafirmar todas las observaciones realizadas.

5.3.2. Mina Ejemplo 2

Los dimensiones y tiempos de servicio de esta mina pueden verse en la Tabla E.1b. Esta mina es mas pequeña que la anterior y utiliza tiempos de carga y descarga mas uniformes. Por tal motivo es natural que el algoritmo Buscador $-\alpha$ utilizado por MI evalúe que la solución estándar sea la mejor. De hecho para los tamaños de flota 17 y 19 ésta es la misma solución que encuentra la metodología MP, como se puede ver de la Tabla 5.6. La solución para una flota de 15 camiones es distinta.

Por tal motivo, los resultados de la Tabla 5.5, son idénticos para los tamaño de flota 17 y 19 para ambas políticas MP y MI. Además con un tamaño de flota de 17, la productividad tiene su menor diferencia con la predicción que realizan ambos métodos. En cuanto a la Figura 5.6, se puede ver que el desempeño, en general, de las políticas MI y MP es superior en todos los índices de desempeño. De hecho el gráfico de Pr tiene una forma muy similar al gráfico de I_{tc} , mostrando una relación directa entre la reducción del tiempo de ocio y el aumento de la productividad, en este ejemplo.

El comportamiento general es similar al del ejemplo anterior pero aparece un nuevo fenómeno. Con una flota de 19 camiones el comportamiento de la política MP es mejor a las referencias pero sólo con su velocidad limitada (MP20) . La versión MP no produce un aumento en la productividad tan substancial (Figura 5.6a) y directamente es la referencia en el caso de RPR del consumo de combustible por camión descargado.

Sin embargo, el comportamiento de la política MP20 es el mas intuitivo, algo que permite ver la Tabla 5.5. La productividad con 15 vehículos es la mayor, después cae ligeramente y se observa un comportamiento prácticamente igual con 17 y 19 vehículos.

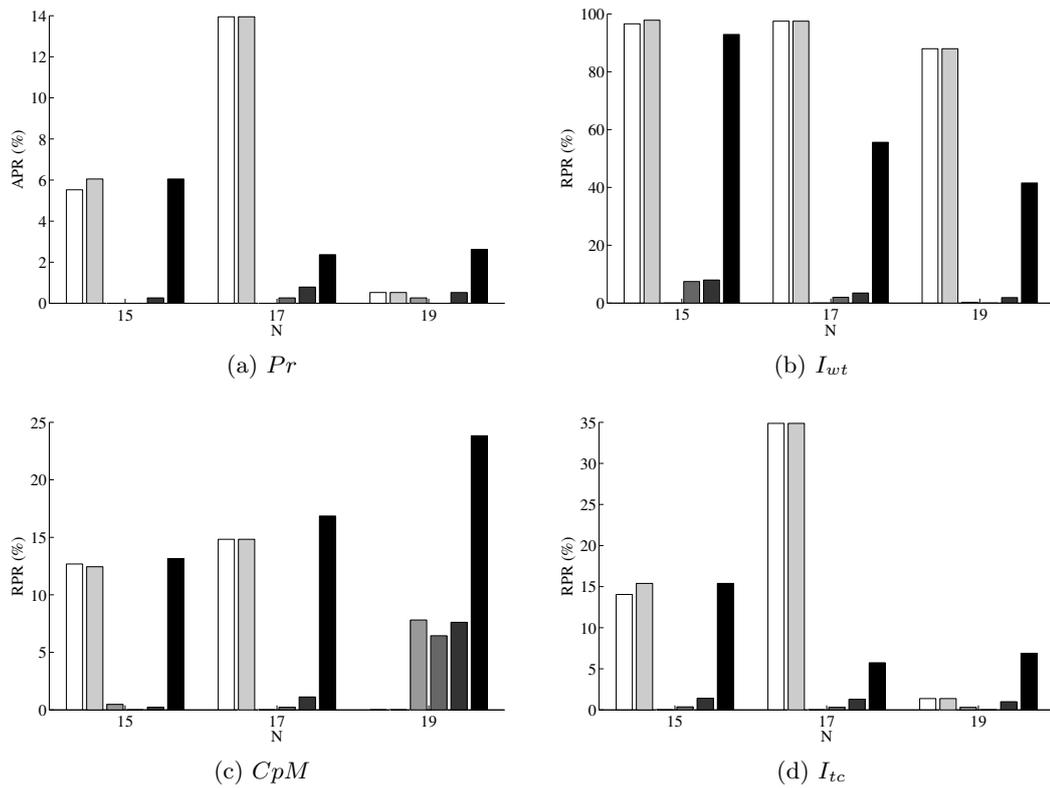


Figura 5.6: Resultados del APR (Definición 2.14) de Pr (a) y del RPR del I_{tw} (b) , CpM (c) e I_{tc} (d) para cada una de las políticas utilizadas en la mina ejemplo 2. El fenómeno mas llamativo de estos resultados es el fenómeno del pico productividad que se produce con una flota de 17 camiones. Además, en este ejemplo limitar la velocidad mínima que es capaz de asignar el ajuste de velocidad (política MP20) no afecta tanto el desempeño de la política MP como en el anterior.



Metodología	N		
	15	17	19
MP	401	433	383
MI	403	433	383
PL	380	380	382
EC	380	381	381
CM	381	383	383
MP20	403	389	391

(a) Pr

Metodología	N		
	15	17	19
MP	0.66	0.83	5.8
MI	0.42	0.83	5.8
PL	19.31	33.31	48.1
EC	17.87	32.65	48.23
CM	17.77	32.15	47.31
MP20	1.37	14.79	28.2

(b) I_{wt} en horas

Metodología	N		
	15	17	19
MP	3.65	3.79	5.12
MI	3.66	3.79	5.12
PL	4.16	4.45	4.72
EC	4.18	4.44	4.79
CM	4.17	4.4	4.73
MP20	3.63	3.7	3.9

(c) CpM en litros

Metodología	N		
	15	17	19
MP	9.63	7.19	10.73
MI	9.48	7.19	10.73
PL	11.21	11.04	10.85
EC	11.17	11.01	10.88
CM	11.05	10.90	10.78
MP20	9.48	10.41	10.13

(d) I_{tc} en horas

Tabla 5.5: Resultados de los índices de desempeño para cada política en la mina 2.

	N = 15	N = 17	N = 19
\mathbf{X}	{4 5 6}	{1 1 1 1}	{1 1 1}
\mathbf{Y}	{6 6}	{1 1}	{1 1}
P_p	476.2	480	480
I_{tp}	4.3	4	4

(a) MP

\mathbf{X}	\mathbf{Y}	P_p	I_{tp}
{1 1 1}	{1 1}	480	4

(b) MI

Tabla 5.6: Soluciones y predicciones de los métodos MP y MI para la mina ejemplo 2.

Esto permite ver que la mina está saturada con estos tamaños de flota. Más aún, los valores máximos de productividad concuerdan con los valores que se logran con las otras políticas de referencia. Además de esto, el tiempo de espera, el consumo y el tiempo de ocio de los nodos aumenta con el incremento en el tamaño de flota. En cambio, la técnica MP tiene un pico pronunciado en su productividad que incluso coincide con una baja del tiempo de ocio de los nodos, si la flota es de 17 camiones. El nivel de productividad, cuando la flota pasa a ser de 19, cae y es comparable al de todas las demás políticas. Este comportamiento, en principio no se observó en el ejemplo anterior.

5.3.3. Mina Ejemplo 3

Uno de los principales objetivos de la mina ejemplo 3 es simular una mina de un tamaño mayor a las dos anteriores, teniendo 3 puntos de descarga y 5 puntos de carga. Además se intentó diversificar los tiempos de los nodos con el fin de mostrar como se adaptan los algoritmos a estas situaciones. Los datos que describen el grafo se pueden encontrar en la Tabla E.1c.

Esta vez, la solución del algoritmo MP es idéntica para los tres tamaños de flota elegidos (22, 24 y 26), mientras que la solución del algoritmo MI provee de una secuencia de despacho para los nodos de descarga larga y que no coinciden con la hallada con MP. Las soluciones se pueden ver en la tabla 5.8.

La comparación de los desempeños de las políticas puede verse en la Figura 5.7. Con 22 vehículos MI se comporta mejor que MP siendo ambas superiores en desempeño en todos los índices de desempeño. Al sumar dos vehículos más, ya el desempeño de MI es el mejor, pero el de MP es el de referencia en cuanto a la productividad. Las mejoras siguen siendo substanciales en tiempo de espera. En cuanto al consumo, MI es la mejor y MP sigue mejorando las políticas de referencia. Cuando el tamaño de flota es el mas grande, MP20 y CM son las mejores políticas en cuanto a productividad.

Esta mina presenta otro ejemplo de lo que se marcó anteriormente en cuanto a la

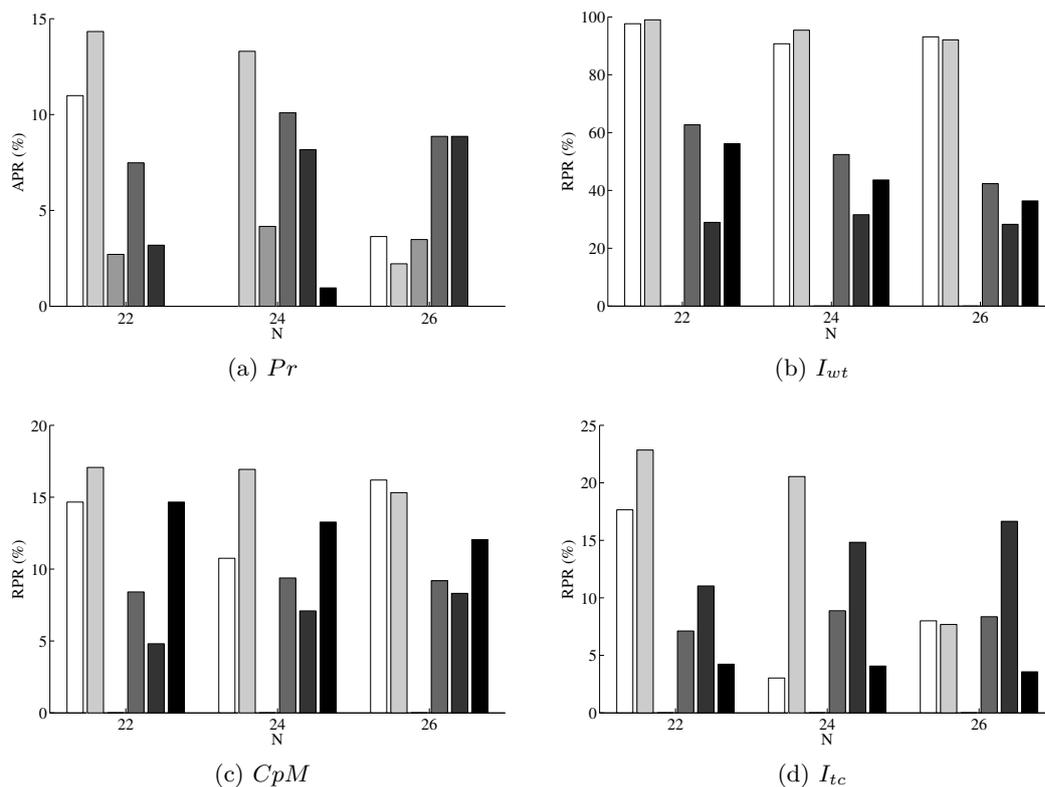


Figura 5.7: Resultados del APR (Definición 2.14) de Pr (a) y del RPR del I_{tw} (b), CpM (c) e I_{tc} (d) para cada una de las políticas utilizadas en la mina ejemplo 3. La mejora de la productividad de las políticas MP/MI sólo se ve con 22 camiones. En el I_{tw} y el CpM las mejoras siguen siendo significativas. El comportamiento de la MP20 es bueno y en algunos aspectos, como la productividad para 26 vehículos, sobrepasa en desempeño a MP.



Metodología	N		
	22	24	26
MP	697	624	655
MI	718	707	646
PL	645	650	654
EC	675	687	688
CM	648	675	688
MP20	628	630	632

(a) Pr

Metodología	N		
	22	24	26
MP	1.21	6.14	5.55
MI	0.52	3.04	6.39
PL	51.72	66.23	80.65
EC	19.29	31.52	46.51
CM	36.74	45.3	57.85
MP20	22.65	37.34	51.31

(b) I_{wt} en horas

Metodología	N		
	22	24	26
MP	3.55	3.9	3.83
MI	3.45	3.63	3.87
PL	4.16	4.37	4.57
EC	3.81	3.96	4.15
CM	3.96	4.06	4.19
MP20	3.55	3.79	4.02

(c) CpM en litros

Metodología	N		
	22	24	26
MP	24.13	28.11	26.37
MI	22.60	23.03	26.46
PL	29.30	28.99	28.66
EC	27.21	26.42	26.27
CM	26.06	24.69	23.89
MP20	28.06	27.81	27.64

(d) I_{tc} en horas

Tabla 5.7: Resultados de los índices de desempeño para cada política en la mina 3.

	N = 22	N = 24	N = 26
\mathbf{X}	{1 1 1 1 1}	{1 1 1 1}	{1 1 1 1}
\mathbf{Y}	{1 2 3}	{1 2 3}	{1 2 3}
P_p	822.9	822.9	822.9
I_{t_p}	17.48	17.48	17.48

(a) MP

\mathbf{X}	\mathbf{Y}	P_p	I_{t_p}
{1 1 1 1 1}	{64 89 146}	921.5	11.28

(b) MI

Tabla 5.8: Soluciones y predicciones de los métodos MP y MI para la mina ejemplo 3

relación entre la productividad y los tiempos de ocio de los nodos. Cuando la flota es de 26 camiones, CM y EC tienen el mismo valor de Pr , mientras que el tiempo de ocio acumulado de CM es de 3 horas menor que el de EC. Nuevamente esto se debe a un uso desbalanceado de EC de los nodos de carga.

Al crecer el tamaño de la flota de 22 a 26 camiones, se muestra una caída pronunciada de la productividad, esta vez por parte de la política MI. En este caso particular, como se ve en la Tabla 5.7a, se logran obtener más de 70 descargas adicionales con cuatro vehículos menos. Esto, no es para nada intuitivo por lo que se tomará como ejemplo para analizar este tipo de fenómeno.

En primer lugar, las grandes diferencias de productividad se ven con flotas grandes. Esto es por que si se logra hacer que cada camión, en promedio, descargue una vez más en el período de simulación, entonces la productividad podría aumentar en el tamaño de la flota. De la misma forma, si al aumentar una flota se crean interferencias inevitables entre los vehículos, cada camión podría completar, en promedio, un viaje de descarga menos. Esto dará a lugar a una caída en la productividad de una magnitud similar al tamaño de la flota. En resumen con flotas grandes, ligeros cambios en los tiempos de viaje y/o tiempos de espera puede causar grandes fluctuaciones en la productividad.

A pesar de esto, en la mina ejemplo 3, la caída de la productividad es de más de 70 descargas, es decir aproximadamente el triple del tamaño de la flota. Por lo tanto el objetivo, a continuación, será derivar un pequeño modelo que utilice los datos obtenidos de las simulaciones para poder calcular, de forma simple, la diferencia de productividad y contrastarla con la diferencia observada.

El primer dato que debe considerarse son los tiempos de viajes medidos. Éstas magnitudes se obtienen de promediar el tiempo necesario, que se midió en la simulación, para que un vehículo viaje de un punto de carga a uno de descarga o viceversa. Estas magnitudes difieren del r_{ij} y q_{ij} , por lo que se diferencian notándolos rm_{ij} y qm_{ij} .

El segundo dato necesario es el tiempo promedio de espera de los camiones, denomi-

N	U_1	U_2	U_3
22	553.6	631.7	709.4
26	538.8	608.0	1202.9

(a) T_{tj} en segundos

N	U_1	U_2	U_3
22	11.5	8.6	5.46
26	133.8	95.1	92.7

(b) T_{w_j} en segundos

Tabla 5.9: La tabla (a) muestra el promedio de los tiempos de viaje de ida y vuelta (en segundos) desde los puntos de carga a cada uno de los puntos de descarga. La tabla (b) son los tiempos de espera promedio por cada ciclo para la mina ejemplo 3.

nado T_{wN} , donde N es el tamaño de la flota. Este valor es el promedio de los tiempos totales de espera de cada camión individual, durante el intervalo de simulación T_{ST} .

Para que un vehículo descargue en el nodo U_j , debe cumplir un ciclo completo compuesto por su viaje de U_j a L_i , el tiempo de espera y de servicio en L_i , su retorno y finalmente su espera y descarga en U_j . Para construir un modelo simplificado que permita calcular las productividades con los datos medidos y los tamaños de flotas es necesario estimar todas estas magnitudes. Se comienza, entonces haciendo una simplificación sobre los tiempos de viaje. Se denomina M_j al número de descargas en el nodo U_j . Dada la solución del algoritmo MI (en la Tabla 5.8), se puede considerar que M_j está compuesto de proporciones iguales de camiones que vienen de cada uno de los nodos de carga. Por lo tanto es posible simplificar los tiempos viajes haciendo el promedio de rm_{ij} y qm_{ij} para cada nodo de descarga. A este valor se lo denomina T_{tj} y se calcula como,

$$T_{tj} = \frac{\sum_{i=1}^S rm_{ij} + \sum_{i=1}^S qm_{ij}}{S}. \quad (5.1)$$

Los resultados de aplicar la Ecuación (5.1) a los tiempos de viajes medidos en las simulaciones de la mina ejemplo 3, pueden verse en la Tabla 5.9. Como resultado de esta cuenta el tiempo de servicio considerado para la carga, también es el promedio de los tiempos de carga (t_{sm}), es decir 112.2 segundos. El tiempo de servicio de cada nodo de descarga será t_{p_j} , por lo que sólo queda estimar el tiempo de espera de los vehículos. Se denominará T_{w_j} al tiempo promedio de espera de un camión que realiza un viaje

al nodo U_j . Esta magnitud incluye el tiempo de espera tanto en la carga como en la descarga. Se calcula tomando el tiempo promedio total de espera por camión (T_{wN}) y dividiéndolo por el número de viajes al nodo U_j , es decir M_j . Entonces $T_{w_j} = \frac{T_{wN}}{M_j}$ se puede interpretar como el tiempo de espera promedio de cada camión al hacer M_j viajes al nodo U_j . Sin embargo, el número de viajes depende del tiempo de espera. En efecto, si el intervalo de simulación es T_{ST} entonces el número de viajes de un camión a U_j , estará dado por

$$M_j = \frac{\alpha_{p_j} T_{ST}}{T_{w_j} + T_{t_j} + t_{sm} + t_{p_j}}. \quad (5.2)$$

La Ecuación (5.2) cuantifica el número de veces que es posible, para un solo camión, completar el ciclo de descarga al nodo U_j en el tiempo de simulación. Este número es pesado por el valor de α_{p_j} (ver Ecuación 3.24 en la Sección 3.4) ya que esa será la proporción de viajes a U_j a que le corresponde, a cada camión, de todos los viajes al conjunto de nodos de descarga, de acuerdo a las solución que hallada por MI. Por lo tanto combinando la Ecuación (5.2) con $T_{w_j} = \frac{T_{wN}}{M_j}$, se obtiene la expresión,

$$T_{w_j} = \frac{T_{wN}(T_{t_j} + t_{sm} + t_{p_j})}{T_{ST}\alpha_{p_j} - T_{wN}}. \quad (5.3)$$

Los valores que se obtienen para cada uno de los tamaños de flota de los tiempos de espera promedio se pueden ver en la Tabla 5.9b. Por lo tanto los resultados mostrados permiten ver claramente que la diferencia de productividad se debe a dos motivos. El aumento en el tiempo de viaje de los nodos de carga al nodo U_3 (en la dirección opuesta son iguales para los dos tamaños de flota) y el aumento de los tiempos de espera promedio. Esto se debe a que el incremento en la flota hace que el despacho entre en un ritmo tal que el algoritmo de velocidad no puede realizar los ajustes de la mejor forma posible incrementado los tiempos de viajes y además causando colas. La productividad es la suma de los M_j . Utilizando los valores ya presentados, la productividad calculada

para la flota de 22 camiones resulta 731.8 y para 26 es de 662.8. Éstos valores son muy próximos a los de la Tabla 5.7 y además se observa claramente que la diferencia es de aproximadamente 69 descargas.

Uno de los datos estadísticos que guarda el simulador es el promedio de las velocidades crucero que se le asignan a cada camión de forma individual. En la simulación con la flota de 22 camiones, todos los promedios están por encima de 32 km/hr mientras que la simulación con 26 camiones reveló que todos los promedios están por debajo de los 30 km/hr y llegan tan bajo como 22 km/hr. Uniendo estos hechos junto con los datos de la Tabla 5.9, se puede ver que la política de velocidad no puede manejar lo suficientemente bien el flujo de camiones enviados, principalmente, al nodo U_3 aumentando el tiempo de viaje y reduciendo la productividad.

La productividad de MI20 es prácticamente idéntica para 22 y 26 camiones, con 640 descargas aproximadamente. Esto quiere decir que el aumento de productividad depende de la política de velocidad y de la asignación de velocidades objetivos con valores menores a los 20 km/hr. Lo que es más, el resultado depende también de las proporciones (valores $-\alpha$) de las soluciones. Esto surge del hecho de que MP no tiene la limitación de velocidad objetivo mínima y aún así su productividad no llegó a los niveles de la política MI. De hecho, la solución que halló MI ni siquiera fue contemplada por MP ya que la suma de sus componentes (C_x y C_y) es mayor que el límite máximo considerado en el algoritmo de MP. Sin embargo, si se utiliza la Ecuación (3.18) para predecir la productividad con los tiempos de viaje calculados (utilizando distancia dividido V_{ref}) y la solución hallada por MI el resultado es $P_p \simeq 921$. Es decir que con la solución de MI el modelo completo realiza una predicción de productividad que es superior a la de la solución que se eligió.

5.3.4. Mina Ejemplo 4

Los tres ejemplos anteriores utilizan topologías de la mina idénticas a la mostrada en al Figura 2.1. Este tipo de topologías tienen la particularidad de nunca poner a

Metodología	N		
	30	46	62
MP	501	588	621
MI	518	588	621
CM	528	576	576
LP	512	571	571
EC	545	573	573
MI20	515	565	577

(a) Pr

Metodología	N		
	30	46	62
MP	0	0.02	0.68
MI	0	0.02	0.68
CM	40.36	139.23	253.97
LP	47.43	138.97	253.43
EC	28.53	138.92	255.55
MI20	0.94	58.41	160.36

(b) I_{wt} en horas

Metodología	N		
	30	46	62
MP	8.46	7.89	7.67
MI	8.93	7.89	7.67
CM	11.15	12.52	14.06
LP	11.22	12.89	14.49
EC	11.14	12.81	14.35
MI20	8.92	8.71	9.9

(c) CpM en litros

Metodología	N		
	30	46	62
MP	12.26	8.82	7.4
MI	11.55	8.82	7.4
PL	11.87	9.35	9.33
EC	10.37	9.29	9.29
CM	11.22	9.28	9.27
MI20	11.64	9.68	9.21

(d) I_{tc} en horas

Tabla 5.10: Resultados de los índices de desempeño para cada política en la mina 4.

dos camiones con distintos destinos en un mismo arco. Como consecuencia nunca se prueba la efectividad del ajuste de velocidad en éstas situaciones, a pesar de que están contempladas por el algoritmo desarrollado en la Sección 4. Por ende se diseñó un ejemplo que tiene 6 nodos, 2 de carga y 2 de descarga, con la topología que se muestra en la Figura 4.1. Las distancias y pendientes se encuentra detalladas en la Tabla E.2b.

La comparación de los resultados se muestra en la Figura 5.8 y los valores absolutos en la Tabla 5.10. De la figura de comparación se pudo ver que el desempeño de MI y MP con una flota de 30 camiones es inferior, en productividad, al resto de las políticas. Aún así se logra una excelente reducción de los tiempos de espera y en el consumo de combustible. Lo que es más, la mejora lograda en estos dos índices de desempeño es considerable aún utilizando MI20. También se observa que el gráfico de I_{tc} posee, nuevamente, una forma similar al del aumento de la productividad.

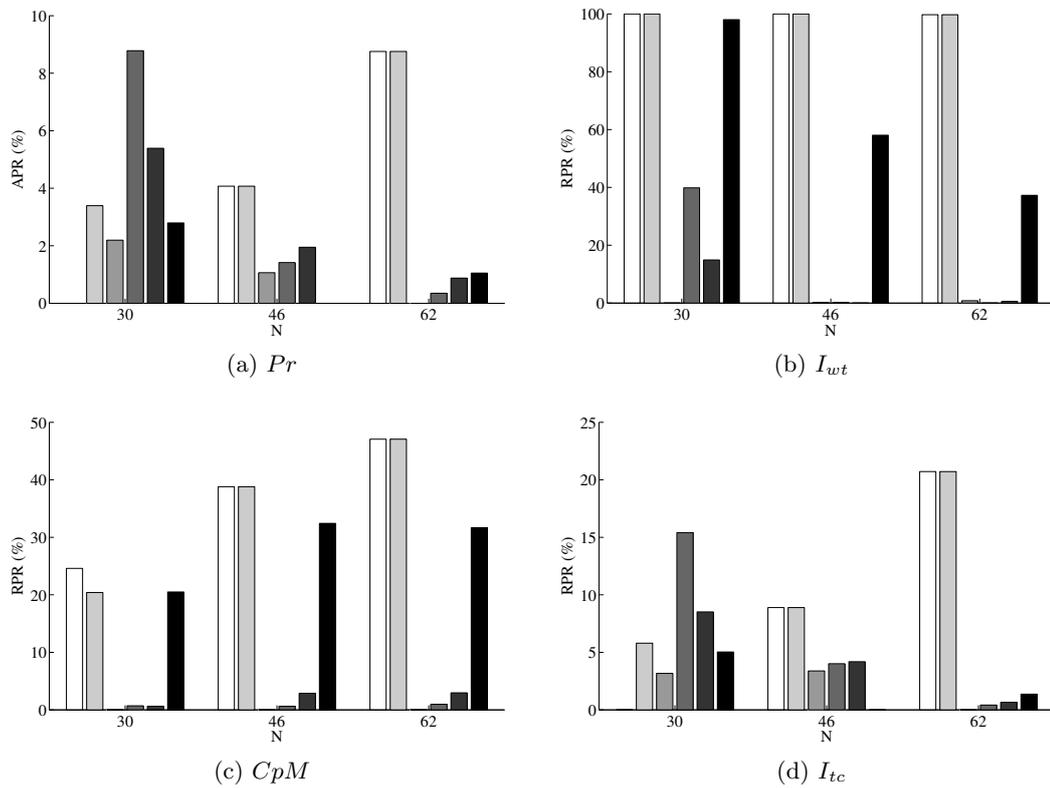


Figura 5.8: Resultados del APR (Definición 2.14) de Pr (a) y del RPR del I_{tw} (b) , CpM (c) e I_{tc} (d) para cada una de las políticas utilizadas en la mina ejemplo 4. Esta mina cambia la topología con respecto a las anteriores. El gráfico de la productividad deja en claro que los beneficios de MP/MI se muestran con grandes flotas de vehículos ya que en esos casos la productividad es superior a la políticas de comparación, mientras que el desempeño en cuanto a I_{tw} y CpM es en todos los casos ampliamente superior. En cuanto al I_{tc} , MP y MI funcionan directamente como las políticas de referencia.

MP
 MI
 PL
 EC
 CM
 MI20

	N = 30	N = 46	N = 62
X	{10 10}	{3 4}	{3 4}
Y	{11 11}	{4 3}	{4 3}
P_p	708	840	840
I_{t_p}	4.47	0	0

(a) MP

X	Y	P_p	I_{t_p}
{3 4}	{4 3}	840	0

(b) MI

Tabla 5.11: Soluciones y predicciones de los métodos MP y MI para la mina ejemplo 4.

Los tiempos de viaje medidos para MI y MP son, en general, superiores a los de las demás políticas, lo que es una consecuencia del ajuste de velocidad y de la topología de la mina. Una situación típica se dará cuando dos camiones (por comodidad se denominarán H_0 y H_1) se encuentran en el arco que conecta el nodo 2 con el nodo 3 (de la Figura 4.1). El camión H_0 se encuentra más próximo al nodo 3 y se dirige al nodo de carga 4 con algunos vehículos más adelantados en el mismo camino. Por lo tanto la velocidad de H_0 se ajustará acorde a la situación. Pero el camión H_1 , que se encuentra siguiendo a H_0 tiene como destino el nodo 6 y tiene pocos vehículos (o ninguno) que llegarán a 6 antes que él. Esto hará que el tiempo de viaje de H_1 sea mas largo que lo necesario. Cuando el número de camiones es bajo y estas situaciones se dan a menudo, el resultado será una caída en la productividad.

La Figura 5.8 le da respaldo a esta justificación ya que la mejora en productividad y consumo de combustible se hace mas notoria con una flota de 46 vehículos y es excelente con una flota de 62. Es importante recalcar, nuevamente que las mejoras logradas son considerables aún cuando la velocidad mínima asignable es limitada.

Los resultados de los algoritmos se muestran en la Tabla 5.11. La solución de MP varió solamente para el tamaño de flota de 30, siendo idéntica a MI para todas las demás.

En general, el desempeño de las políticas MP y MI es superior a las de referencias pero sólo con tamaños de flota grandes. Esto es claramente un resultado del cambio de la topología de la mina.

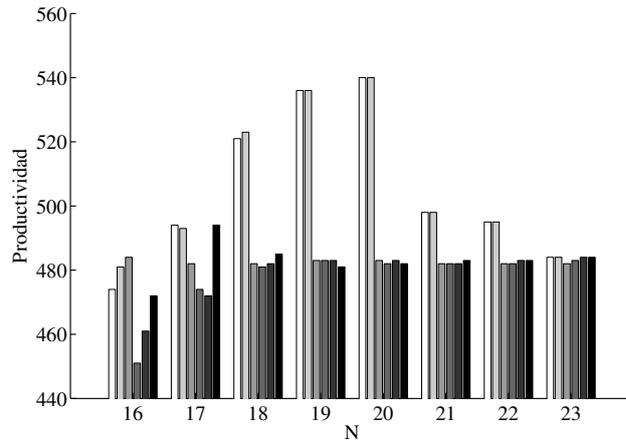
5.3.5. Resultados Globales

Con el ejemplo de la mina 2 se vio un fenómeno en el cual al aumentar el tamaño de la flota en dos vehículos la productividad aumentaba notablemente y luego disminuía al sumar dos vehículos mas a la flota. Este fenómeno también se observó con la política MI en la mina ejemplo 3. En esta sección se muestra que éste fenómeno está presente, en todos los ejemplos mostrados.

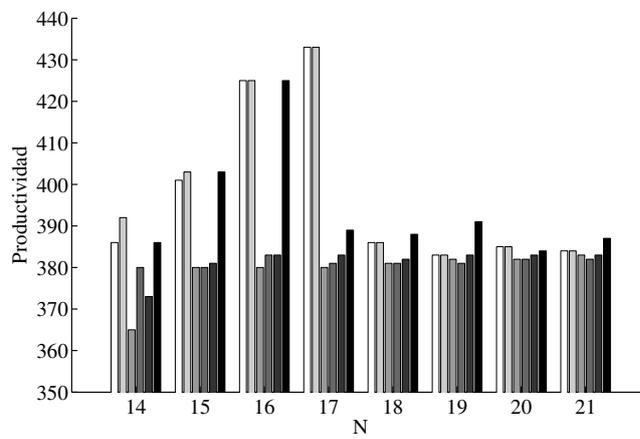
La Figura 5.9 muestra el número de descargas logradas, para cada mina, para un conjunto de tamaños de flotas. La Figura 5.9a muestra que la productividad crece conforme crece el tamaño de la flota de 16 a 20 vehículos. Cuando el tamaño de la misma se hace mayor a 20, la productividad comienza a decaer nuevamente y a partir de 23 camiones todas las políticas se comportan de manera similar. La política MP20 exhibe el mismo comportamiento pero el pico se produce en 17 vehículos y la forma es mucho menos pronunciada. Las demás políticas de referencias presentan un comportamiento de saturación (a partir de 18 vehículos) sin la presencia de un máximo.

El fenómeno es igual de claro en la mina ejemplo 2, como lo muestra la Figura 5.9b. En esta ocasión el pico de productividad también es pronunciado aún con la velocidad limitada. El pico con MP y MI ocurre con 17 vehículos, mientras que con MP20 ocurre en 16. Esto es evidencia directa de que la política de ajuste de velocidad es uno de los factores que hace posible este comportamiento.

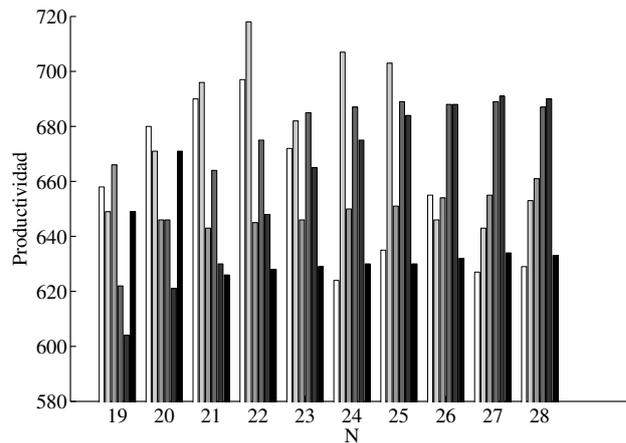
Finalmente, en la mina 3 el fenómeno no es tan claro debido a las oscilaciones que presentó la productividad de las políticas MP y MI. Aún así es posible ver que para ambas políticas el pico ocurre con un flota de 22 vehículos, siendo en este caso, superior el desempeño de MI. Además con altos valores de flota, la productividad es dominada



(a) Mina 1



(b) Mina 2



(c) Mina 3

Figura 5.9: Las figuras muestran la productividad versus el tamaño de flota para la mina 1 (a), 2 (b) y 3 (c). En ellas se puede ver que todas las minas ejemplo presentan un fenómeno en el cual para un tamaño de flota específico se logra un máximo de productividad que no puede lograrse con flotas mayores o menores. Este fenómeno es un efecto de la política de ajuste de velocidad, la secuencia de despacho y de la topología de la mina.



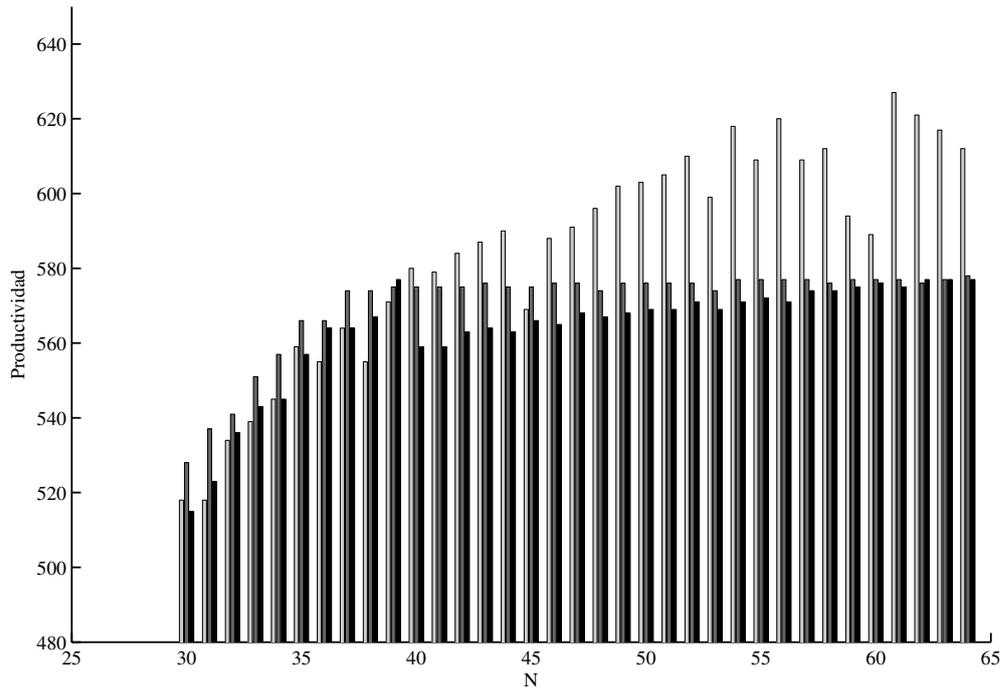
por EC y CM, como ya se explicó en la sección del ejemplo 3.

Esta evidencia sugiere la existencia de un fenómeno de pico máximo de productividad. Es decir que para una dada mina, existe un tamaño de flota particular que es capaz de generar un ritmo de despachos tal que los vehículos se interfieren mínimamente entre sí, se eliminan los tiempos de espera y se logra un gran nivel de productividad que no se alcanza con más o menos camiones. La ubicación de este pico es claramente dependiente de la política de ajuste de velocidad, como lo demuestra el cambio en el comportamiento cuando la velocidad de cruceo mínima se limita a 20 km/hr. También es dependiente de la secuencia de despacho ya que los picos ocurren con distintas magnitudes y con distintos tamaños de flota, en función de las soluciones de los problemas MP y MI.

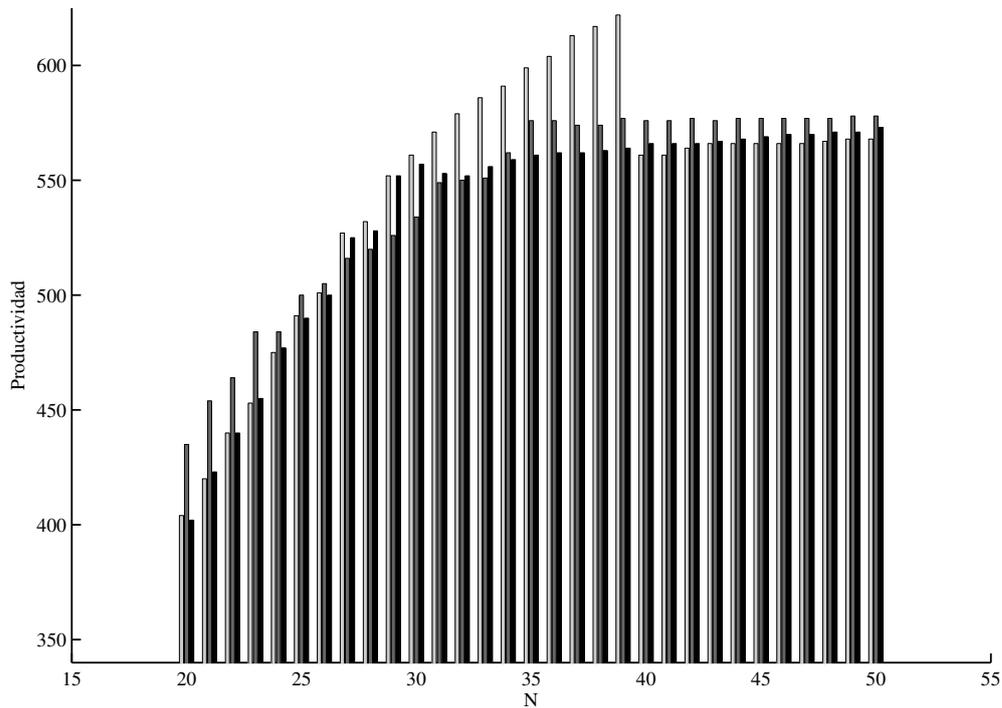
La Figura 5.10a muestra el resultado de realizar múltiples simulaciones con tamaños de flota monótonamente crecientes en la mina ejemplo 4. Debido a la gran cantidad de datos que eran necesarios mostrar (tamaños de flota), la Figura 5.10 solo incluye las políticas con mejor comportamiento. Estas son MI y MI20, de los algoritmos propuestos y CM.

El fenómeno del pico de productividad no se observa aquí. En su lugar se puede ver que la productividad tiende a saturar, pero para grandes tamaños de flotas, en lugar de mantenerse constante los valores fluctúan. En cambio, se puede observar un comportamiento más estándar con las políticas CM y MI20. Las fluctuaciones pueden ser explicadas precisamente por el gran tamaño de flota. En magnitud, las diferencias más grandes son de aproximadamente 30 descargas. Esto es sólo la mitad del tamaño de la flota, por lo que estas variaciones son una diferencia inferior, en promedio, a una descarga por camión.

El resultado de la Figura 5.10a es llamativo, ya que todos los otros ejemplos poseen el máximo de productividad bien definido. Sin embargo, para la mina ejemplo 4 se tiene una topología distinta de los otros casos. Para verificar la influencia de este factor, se diseñó una mina que tuviera 4 nodos en una topología como la de la Figura 2.1



(a) Formato original



(b) Formato estándar

Figura 5.10: Las figuras muestran la productividad de la mina 4 versus el tamaño de flota, cuando la mina posee la topología original (a) que se muestra en la Figura 4.1 y con la topología estándar (b) que se muestra en al Figura 2.1. El fenómeno de pico de productividad se muestra claramente con la topología estándar mientras que parece no presentarse (al menos no tan claramente) con la topología original. Esto indicaría que el fenómeno está fuertemente relacionado con la topología.

MI CM MI20

pero cuyas distancias y tiempos de servicio se correspondieran con los de la mina del ejemplo 4 original. La Tabla E.2a contiene la descripción del grafo resultante y la Figura 5.10b muestra el resultado de productividad con tamaños de flota crecientes. El fenómeno de pico de productividad, ahora, puede ser observado perfectamente y ocurre con una flota de 39 camiones. Es notable que el nivel de productividad más alto, que se logra utilizando MI, se corresponde con los niveles alcanzados en las simulaciones con la topología original. Además, se logra llegar a esos valores con un tamaño de flota menor. Esto es comprensible ya que la forma estándar de la mina permite una paralelización del flujo de vehículos, mientras que la forma mostrada en la Figura 4.1 presenta un cuello de botella significativo, aumentando los tiempos de viajes promedio. En conclusión, el fenómeno de pico de productividad depende también de la topología de la mina.

Si bien en la Sección 5.3.3, fue posible realizar una cuenta relativamente simple que explicara por que la productividad decrece al aumentar la flota, en ciertas situaciones, el origen del fenómeno aún no fue aclarado. La evidencia muestra dos factores claves, en principio, no intuitivos: el uso de la política de velocidad y la topología de la mina.

El efecto de la política de velocidad es la eliminación de las colas. Es claro que la finalidad del ajuste de velocidad es transformar el tiempo de espera en tiempo de viaje, asignándole a los vehículos una menor velocidad objetivo. La razón por la que esto aumenta la productividad, tiene que ver directamente con un fenómeno muy simple asociado a la física de movimiento en las colas. Cuando un camión llega a un nodo desocupado es atendido directamente. Sin el nodo está ocupado, entonces debe frenar por completo para esperar que el camión que tiene por delante termine de ser atendido. Cuando el nodo queda desocupado, el vehículo no es atendido directamente ya que debe recorrer una pequeña distancia hasta llegar al punto en donde debe ser atendido. En las simulaciones, este período entre que un camión pasa a ser el primero en una cola y efectivamente comienza su tiempo de servicio en el nodo es de aproximadamente 27 segundos. Esto implica que mientras mas larga sea una cola mas se aumentará el tiempo

improductivo de un nodo debido a esos 27 segundos, por cada camión que pase del segundo al primer puesto en la cola. Por lo tanto, la eliminación de largas colas puede significar un aumento muy grande de la productividad. Sin embargo, si el tamaño de la flota aumenta entonces las colas se formarán, sin importar el ajuste de velocidad y la productividad podrá ser menor con respecto a flotas mas pequeñas.

La influencia de la topología de la mina en la productividad en conjunto con el ajuste de velocidad fue explicado en la 5.3.4. Este problema podría ser solucionado cambiando a la política de ajuste de la siguiente manera. Si dos vehículos, que van a distintos destinos, se encuentran en un mismo arco, entonces se calcula la velocidad a la que debe ir cada uno, sólo en función de lo que deberán esperar en sus nodos destinos. Si el camión que se encuentra por detrás debe ir más rápido, ambos camiones será asignados con esa velocidad. De lo contrario, no es necesario hacer nada distinto ya que el camión de enfrente debe ir más rápido que el que se encuentra atrás. Esto no acortaría innecesariamente los tiempos de viajes, a precio de que las colas se formarán con mayor facilidad. Esto es factible ya que siempre existirá un arco que lleve a un nodo destino y sólo a ese nodo destino. El ajuste de velocidad será utilizado fuertemente en ese arco, para compensar en el caso de que un camión halla ido más rápido de lo que debía en arcos previos.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones

En la presente tesis se estudió la temática del enrutamiento para vehículos de transporte de carga. Se estudió un caso particular que es la selección de los puntos de carga y de descarga en una operación de minería a cielo abierto. En este contexto el problema es conocido como despacho.

Se desarrolló una metodología novedosa para la selección de destinos y el control de la velocidad de los vehículos de transporte. Las problemáticas que se necesitaron resolver se detallan a continuación.

- Se definió un marco general de estudio que permitiera evaluar el desempeño de una operación minera.
- Se definió una métrica para poder realizar comparaciones que permitieran evaluar efectivamente la eficiencia de una técnica de despacho.
- Se implementó un modelo de los vehículos para poder realizar una simulación de los mismos con el objetivo de establecer las variables y tiempos necesarios para la comparación de técnicas de despacho.

- Se definió una nueva metodología que permitiera asignarle el destino al cual debería dirigirse un dado vehículo.
- Se desarrolló una metodología que para asignar y corregir las velocidades objetivo de todos los vehículos de la mina, con el objetivo de eliminar los tiempos de espera en las colas.

Se comenzó definiendo un marco de condiciones de borde que establecen la operación de transporte de materiales como una flota de vehículos moviéndose sobre los arcos de un grafo. Aún así, existen ciertas particularidades presentes en las operaciones mineras que permitieron algunas simplificaciones. A continuación se detallan las principales condiciones de borde.

- La operación minera funciona normalmente durante lapso temporal en la cual se la estudia. Esto implica que existe una flota de N vehículos que se mueven de forma ininterrumpida entre un conjunto de nodos de carga y un conjunto de nodos de descarga.
- Es posible considerar los nodos del grafo como puntos de baja velocidad. Por lo que una de las simplificaciones es la imposición de que un vehículo partirá de uno nodo con velocidad nula y llegará al final de un arco, marcado por otro nodo, también con velocidad nula.
- Los vehículos de transporte viajan formando caravanas ya que no es posible que uno sea rebasado. Además al llegar a su destino los mismos formarán colas esperando su turno para cargar o descargar.
- La rapidez en la cual un vehículo alcanzará la velocidad objetivo que le fue impuesta dependerá de la actitud del conductor.

Se implementó un sistema de simulación que sigue estas pautas con el objetivo de poder medir el desempeño de una determinada operación minera. Para ello, fue necesario de-

finir un conjunto de métricas que permitieran calificar el resultado de una simulación y así lograr realizar una comparación con otro conjunto de resultados. Una buena técnica de selección de destinos debe maximizar el número de vehículos que logran realizar su descarga en un dado lapso de tiempo. Además, el equipamiento necesario para el funcionamiento de una mina como camiones, palas, chancadores, etc, tiene un costo muy elevado. Por lo que su amortización depende de que se les dé un uso continuo. Por último, también es importante reducir los costos de la operación y uno de los principales costos es el consumo de combustible. Teniendo en cuenta todo lo anterior se definieron cuatro índices que permiten cuantificar el desempeño de una operación minera. Estos son:

- Pr o productividad. El número total de visitas a todos los puntos de descarga de la mina.
- I_{wt} o tiempo acumulado de espera. Éste es la suma del tiempo de espera total de cada camión durante una simulación y es medido en horas.
- I_{tc} o tiempo acumulado de ocio. Éste valor es la suma de todo el tiempo que cada nodo destino estuvo sin recibir visitas de algún vehículo y es medido en horas.
- CpM o combustible por descarga. Ésta magnitud mide el combustible, promedio, necesario para realizar una descarga y es medido en litros.

Para poder realizar la simulación de la forma en la que fue descrita, era necesario definir un modelo de movimiento, teniendo en cuenta que objetivo del simulador fue la comparación de distintas técnicas de despacho en cuanto a los índices de desempeño. Se optó por modelar un camión en movimiento como un bloque en una rampa ya que ésta opción permitió representar todas las variables que fueron consideradas necesarias para las comparaciones. Como el simulador fue una herramienta de medición y de desarrollo también se consideró fundamental realizar las simulaciones utilizando poca cantidad de datos y gran velocidad.

Los límites de las capacidades de los vehículos fueron impuestos por la datos que son posibles de hallar en sus respectivas hojas de datos, mientras que el funcionamiento nominal se gobernó con una fuerza lineal en el tiempo, de pendiente variable. La selección de la pendiente estuvo condicionada a la actitud del conductor y a cual de los tres comportamiento principales era el más prioritario. En los camiones líderes la mayor prioridad estaba dada en llegar al fin de un camino con velocidad cero y si se estaba muy lejos del final, entonces se debía llegar a la velocidad objetivo y mantenerla. Para un camión seguidor el comportamiento prioritario es no producir una colisión con el vehículo que tiene por delante. Si esto se evalúa como que no es posible, entonces se debía llegar a la velocidad objetivo y mantenerla. Se diseñaron una serie de algoritmos que implementaron cada uno de estos comportamientos, logrando además evitar situaciones indeseadas como aceleraciones de magnitudes muy altas o el frenado completo de un vehículo sólo para no chocar con uno que tiene por delante. Los objetivos cumplidos en el área de modelado de éste trabajo se detallan a continuación.

1. Se implementó un modelo de pocos parámetros que en el cual las actualizaciones de las variables físicas se logran mediante unos pocos condicionales y la evaluación directa de las expresiones de movimiento. No fue necesario utilizar métodos iterativos. Entonces el comportamiento total del vehículo quedará limitado a definir cual es la pendiente de fuerza que utilizará.
2. Se diseñaron una serie de algoritmos que permiten calcular cual es la pendiente de fuerza que debe utilizarse para lograr los comportamientos descritos teniendo en cuenta la actitud del conductor.
3. Se verificó la robustez de los algoritmos de selección de pendiente haciendo varios miles de simulaciones simples y registrando la desaceleración máxima. Se pudo observar que los vehículos se mantienen siempre con un comportamiento razonable.
4. Se comparó la curva de un camión líder con los datos de GPS de un camión real y se

observó que los datos simulados se acercan razonablemente bien a los datos reales, teniendo en cuenta las suposiciones que se realizaron y la simpleza del modelo utilizado.

El próximo paso, luego de la creación del modelo, fue el desarrollo de una nueva técnica de despacho. Una de las falencias principales de las metodologías existentes es que una política de despacho sólo contempla la selección del destino de un vehículo pero no utiliza ningún otro parámetro para controlar el desempeño de la operación. En éste trabajo se propuso utilizar una nueva variable de control, la velocidad objetivo de cada vehículo. De esta forma la metodología final, realiza una elección de destino además de recomendar las velocidades objetivos de todos los camiones de la mina en función del estado de la misma.

La selección de destino se hizo en base a un estudio novedoso en el cual se propone que los puntos de carga y descarga formen dos secuencias de despacho fijas. Así, se desarrolló un modelo del flujo de vehículos en una mina el cual es función de estas secuencias y permite predecir el Pr y el I_{tc} . Con este modelo se desarrollaron dos formas distintas de calcular la secuencia despacho. Una intenta maximizar la productividad (MP) mientras que la segunda tiene como objetivo minimizar el tiempo de ocio de los nodos destino (MI). Para probar la eficacia de estos métodos se presentaron tres metodologías distintas de comparación para poder, así, establecer una referencia. Dos de ellas eran reglas heurísticas mientras que una tercera estuvo basada en un método de programación lineal. En éstas políticas, la velocidad que se le asignaba a los vehículos era siempre la máxima permitida.

Finalmente, se unió el esquema general de una operación minera, el modelo de movimiento y comportamiento y las técnicas de despacho, incluyendo el ajuste de velocidad, en un programa de simulación. Aquí se estudiaron cuatro minas ejemplo y se presentaron los resultados. Además se observó la presencia de una serie de fenómenos ligados tanto al uso de la política de ajuste de velocidades como a la topología de la mina. Estos análisis

arrojaron el siguiente conjunto de conclusiones, las cuales representan los principales logros de este trabajo.

1. Las políticas MP y MI tienen un comportamiento, en la mayoría de los casos, superior o igual a todas las política de referencia en cuanto a productividad. En todos los ejemplos mostrados, la simulación que presenta la máxima productividad para todos los tamaños de flota utilizados, en una dada mina, es lograda con MP o MI.
2. Se demostró que las políticas MP y MI tienen un desempeño mejorado en cuanto al I_{wt} , el CpM y el I_{tc} en todos los casos observados. Además se verificó que esto es una consecuencia directa del uso de la técnica de cálculo de velocidad. La mejoras son substanciales aún cuando se limita la velocidad mínima que el algoritmo puede asignar a un camión a 20 km/hr, y esto se ha mantenido de forma constante a través de todos los ejemplos.
3. Cuando las flotas son de gran tamaño, ligeras variaciones en los tiempos de espera o viaje promedio pueden causar fluctuaciones importantes en la productividad. Esto se debe a que si cada camión completa, en promedio, apenas un viaje de diferencia con otra simulación (con una flota mas grande, por ejemplo), el cambio de la productividad será el tamaño de la flota o inclusive superior dependiendo del cambio en la cantidad de viajes promedio. Se observó que la técnica de ajuste de velocidad tiene incidencia directa sobre éste fenómeno ya que el agregar camiones pasado un determinado tamaño de flota causa caídas pronunciadas en la productividad.
4. El ajuste de velocidad es responsable de un fenómeno de pico de productividad que afectó a las minas ejemplos de una determinada topología. Se mostró que todas las operaciones simuladas presentan un fenómeno en el cual, para un dado tamaño de flota, se obtiene una productividad muy alta, superior a la que puede lograrse con mas o menos vehículos. Se mostró que este fenómeno y el tamaño de flota para

el cual ocurre depende de la secuencia de despacho, ya que los picos, en algunos casos, no fueron de igual magnitud para MI y para MP. Además la dependencia con el ajuste de velocidad es evidente al notar que la magnitud del pico disminuye, e inclusive cambia el tamaño de flota en el cual se logra, al limitarse la velocidad mínima que puede utilizar el ajuste de la misma. El fenómeno del pico de productividad es dependiente de la topología de la mina. Esto se hizo evidente al simular dos operaciones con iguales distancias entre sus nodos de carga y descarga, pero con dos topologías distintas. La operación minera en su formato estándar mostró el fenómeno con gran claridad, mientras que la topología no estándar simplemente mostró como la productividad de la mina saturaba y presentaba oscilaciones al aumentar el número de vehículos, pero no caía de la misma forma que en la mina estándar. Se concluyó que el aumento de productividad se debe al tiempo improductivo necesario para que un camión pase de segundo lugar en una cola al primer puesto donde es atendido. La suma de estos tiempos es mayor conforme mas grande sea una cola. En los casos donde la política de velocidad las tiende a eliminar, entonces el aumento de productividad es muy notable.

5. MP y MI, junto con el ajuste de velocidad, son particularmente efectivas con grandes flotas. Esto implica que las minas están saturadas o cercanas a la saturación. A su vez el desempeño de ambas está sujeto fuertemente a la amplia utilización de velocidades objetivos muy bajas. Esto se evidenció al ver que los beneficios de estas técnicas son menores al limitar la mínima velocidad aceptable a 20 km/hr. Si bien se vieron ejemplos donde aún con la limitación de la velocidad se presenta una mejora en el desempeño de la productividad, esto no es tan notable como cuando este límite no existe. En varios casos las políticas de referencia fueron superiores, en este sentido. Sin embargo, las velocidades bajas no serán un problema en minas autónomas y se podrían obtener importantes beneficios de utilizarlas.

6.2. Trabajos a futuro.

Existe una amplia cantidad de frentes en los cuales se debe continuar la investigación de la líneas propuestas en este trabajo. Todos los fenómenos observados ocurren en simulaciones determinísticas y repetibles. La variedad en la actitud de los conductores, en las velocidades objetivos y en la obediencia de los conductores humanos a las instrucciones del sistema son todos factores que tendrán un alto impacto en el desempeño de cualquier técnica de despacho. Estos factores no han sido contemplados en las simulaciones actuales y es una de la líneas que se deberían perseguir.

La similitud del desempeño entre la política MP y MI es llamativa, dado que MP utiliza un modelo mas complejo. Esto permite suponer que el modelo utilizado es demasiado rudimentario o que los datos utilizados en el mismo se alejan demasiado de los datos reales. Por lo que una mejora importante sería utilizar un método que, en una primera etapa, mida los tiempos de viajes promedios y luego que estime un nueva secuencia con esos datos. La mejora del modelo, sobre todo en cuanto a como se estiman los tiempos de espera también sería crucial en mejorar el desempeño.

El análisis del despacho como una secuencia fija es muy prometedor. Sin embargo, es un método poco flexible, por lo que es importante hallar una forma de hacerlo robusto ante conductores que elijan destinos que no sean los sugeridos por la secuencia. También sería una gran mejora poder lograr que la secuencia se adapte para poder compensar por fenómenos que no se previeron en el modelo de funcionamiento de la mina y de esta forma aumentar su efectividad, sobre todo con tamaños de flotas mas pequeños. Uno de éstos problemas es que si el modelo que se utilizó para calcular la secuencia no fue bueno, es probable que debido a la topología o los cambios en los tiempos de viaje reales, la productividad no sea la mejor. En estos casos el sistema debería reconocer la diferencia en el desempeño e ir modificando dinámicamente la secuencia que se debe utilizar.

Como se han presentado los métodos hasta ahora, se asume que todas las descargas

son igualmente importantes y que el material que se remueve en cualquiera las palas puede ser llevado a cualquiera de los puntos de descarga. En realidad, es posible que una de las palas con esté sacando material de deshecho que sólo puede llevarse a puntos en particulares de la mina. Esto tendría que estar contemplado en la metodología de la secuencia de despacho.

La técnica de ajuste de velocidades utiliza de forma extensiva velocidades objetivo que caen por debajo de los 20 km/hr, en particular cuando los tamaños de flota son grandes. Esto es problemático para conductores humanos ya que las velocidades bajas pueden resultar muy incómodas lo que tenderá a hacer que sean ignoradas. Por lo tanto es necesario mejorar la técnica para que no dependa tanto de estos valores para que el método sea implementable con conductores humanos.

Apéndice A

Pendiente por defecto

La pendiente por defecto del conductor es aquella que le permite llevar a su vehículo desde el reposo a la velocidad objetivo v_c en un tiempo t_c . Éste tiempo guarda una relación con V_{ref} y el T_c del conductor dada por,

$$\frac{v_c}{t_c} = \frac{V_{ref}}{T_c}. \quad (\text{A.1})$$

El objetivo de éste apéndice es deducir la expresión de esta pendiente en función de los parámetros del camión y del conductor. El punto de partida para hallar la expresión es la ecuación de cambio de velocidad de un camión que se mueve utilizando la Regla 3,

$$\Delta v = \frac{F_e \Delta t}{M} + \frac{m_{def} \Delta t^2}{2M}. \quad (\text{A.2})$$

Una vez que el camión llegue a la velocidad objetivo v_c , la misma se mantendrá constante hasta estar próximo al final del camino. Por lo tanto es necesario que F_e se anule y que m sea igual a cero cuando $v = v_c$, es decir condiciones de aceleración nula. Estas son las mismas condiciones que las iniciales (salvo que v es cero). La pendiente de aceleración y desaceleración serán iguales a m_{def} y $-m_{def}$ respectivamente. Por lo que, para llegar a una velocidad objetivo v_c , el camión aplicará m_{def} durante un instante de tiempo

Δt_a , durante el cual F_m se elevará hasta valer $F_1 = R + m_{def}\Delta t_a$. Luego, el conductor aplicará $-m_{def}$ durante un intervalo Δt_d para volver el vehículo a la condición $F_e = 0$. Sin embargo, durante estas dos etapas el camión estará acelerando, con lo cual los cambios de velocidad serán Δv_a y Δv_d . Esto implica que en $\Delta t_a + \Delta t_d$ la velocidad deberá ser v_c . Resumiendo,

$$v_c = \Delta v_a + \Delta v_d, \quad (\text{A.3})$$

$$t_c = \Delta t_a + \Delta t_d, \quad (\text{A.4})$$

$$\Delta v_a = \frac{m_{def}\Delta t_a^2}{2M}, \quad (\text{A.5})$$

$$F_1 = R + m_{def}\Delta t_a, \quad (\text{A.6})$$

$$\Delta v_d = -\frac{m_{def}\Delta t_d^2}{2M} + \frac{(F_1 - R)\Delta t_d}{M}, \quad (\text{A.7})$$

Como observación final, el incremento de la fuerza debe ser igual a su decremento para llegar a la condición $F_e = 0$. Entonces $\Delta t_a = \Delta t_d$ ya que las pendientes de fuerza usadas son iguales pero de signo opuesto. Esto implica que $\Delta t_a = \Delta t_d = \frac{t_c}{2}$. Además de la Ecuación (A.1) se tiene que $t_c = \frac{T_c v_c}{V_{ref}}$. Esto lleva a,

$$v_c = \frac{(F_1 - R)\Delta t_a}{M} = \frac{m_{def}\Delta t_a^2}{M} = \frac{m_{def}t_c^2}{4M} = \frac{m_{def}T_c^2 v_c^2}{4MV_{ref}^2}, \quad (\text{A.8})$$

por lo que la expresión final es,

$$m_{def} = \frac{4MV_{ref}^2}{T_c^2 v_c}. \quad (\text{A.9})$$

Apéndice B

Pendiente de freno de un camión líder

Para determinar cuando un camión líder está lo suficientemente cerca del fin del camino como para necesitar frenar, se compara la pendiente por defecto del conductor con la pendiente que se calcula para llegar a velocidad cero en la distancia que resta hasta el final del arco. Por supuesto, esto supone que el camión está moviéndose, y continuará haciéndolo, con la regla 3. Por comodidad se repiten aquí las ecuaciones de cambio de velocidad y posición de la misma.

$$\Delta v = \frac{F_e \Delta t}{M} + \frac{m \Delta t^2}{2M} \quad (\text{B.1})$$

$$\Delta p = \frac{m \Delta t^3}{6M} + \frac{F_e \Delta t^2}{2M} + v_0 \Delta t \quad (\text{B.2})$$

El objetivo de éste apéndice será calcular la pendiente m negativa necesaria para que el vehículo posea una velocidad nula al llegar al final del camino. En la Ecuación (B.2), Δp representa la distancia al fin del camino en el que está viajando un camión con una fuerza efectiva F_e , una masa M a una velocidad v_0 . Para poder calcular la pendiente, es

necesario utilizar la Ecuación (B.1) para calcular el $\Delta t = t_t$ necesario para obtener una velocidad nula, luego reemplazar dicho valor en la Ecuación (B.2) y despejar m .

Es importante aclarar que si al llegar al fin del camino F_e es no nula, en principio el vehículo podría continuar con su cambio de velocidad, y esto no se desea. Lo que se desea es que el camión quede en reposo. Esto implica que se deberían realizar los cálculos para que no sólo la velocidad sea cero sino la aceleración también. Sin embargo, como se implementó la simulación de tal forma que los vehículos no puedan ir hacia atrás, basta con asegurarse de que F_e sea negativa, lo cual es trivial dado que el vehículo siempre estará en una situación en la cual estaba frenando al llegar al final del camino. En conclusión no es necesario F_e tenga ningún valor en particular, lo cual simplifica significativamente el problema.

Para resolver por el tiempo para llegar a velocidad nula, t_t , Δv es reemplazado por $-v_0$ en la Ecuación (B.1) y se resuelve la ecuación cuadrática. Es importante aclarar que antes de hacerlo se hizo explícito el signo de m por lo que el valor de la misma será considerado positivo. Los dos valores resultantes son,

$$t_{t_1, t_2} = \frac{-F_e}{m} \pm \frac{\sqrt{F_e^2 + 2Mmv_0}}{m}. \quad (\text{B.3})$$

Como el valor de la raíz es mayor que F_e , el tiempo que siempre será positivo y por ende el que se debe utilizar, es el que corresponde a la raíz positiva.

Sustituir el resultado de t_t directamente en la Ecuación (B.2) daría una expresión demasiado complicada. Por lo tanto se define una variable auxiliar. Sea x tal que,

$$x = F_e + \sqrt{F_e^2 + 2mv_0M}, \quad (\text{B.4})$$

entonces la pendiente m y t_t se pueden reescribir de la siguiente forma,

$$m = \frac{(x - 2F_e)x}{2v_0M} \text{ y} \quad (\text{B.5})$$

$$t_t = \frac{2xv_0M}{(x - 2F_e)x}. \quad (\text{B.6})$$

La variable x deberá ser tal que $x > 2F_e$, por definición. Reemplazando las Ecuaciones (B.5) y (B.6) en la Ecuación (B.2) (nuevamente, el signo de m se hace explícito y se considera $\Delta t = t_t$) se obtiene la siguiente expresión,

$$0 = \frac{-3\Delta p(x^2 - 2F_e x)^2 - 2x^3v_0^2M + 6F_e x^2v_0^2M + 6xv_0^2M(x^2 - 2F_e x)}{3(x^2 - 2F_e x)^2}. \quad (\text{B.7})$$

Como el denominador de la Ecuación (B.7) será siempre positivo y estrictamente mayor que cero, sólo es necesario analizar el numerador, el cual se puede reescribir de la siguiente forma,

$$0 = -3\Delta p x^2 + 4(3F_e \Delta p + v_0^2 M)x - 6(2F_e^2 \Delta p + 6F_e v_0^2 M). \quad (\text{B.8})$$

Resolviendo la ecuación cuadrática lleva a dos soluciones de x denominadas x_p y x_n , cuyas expresiones que son,

$$x_{p,n} = \frac{2(3F_e \Delta p + v_0^2 M) \pm \sqrt{4(3F_e \Delta p + v_0^2 M)^2 - 18\Delta p F_e (2F_e \Delta p + v_0^2 M)}}{3\Delta p}. \quad (\text{B.9})$$

Un detalle importante de la Ecuación (B.9) es que la única variable con signo cambiante es F_e mientras que todas las demás magnitudes son positivas. Para comprobar que la solución exista se realiza una verificación del signo del argumento de la raíz,

$$\begin{aligned}
36F_e^2\Delta p^2 + 24F_e\Delta p v_0^2 M + 4v_0^4 M^2 &> 36F_e^2\Delta p^2 + 18v_0^2 M\Delta p F_e \\
4v_0^4 M^2 + 6F_e\Delta p v_0^2 M &> 0,
\end{aligned} \tag{B.10}$$

que será una condición verdadera, siempre que F_e sea positivo. Si esto no sucede entonces la condición para existan soluciones, será que,

$$2v_0^2 M > 3|F_e|\Delta p. \tag{B.11}$$

Si esta condición no se cumple, se está ante una situación en la cual F_e es negativa y suficientemente grande en magnitud que el vehículo llegará a velocidad cero antes de llegar al fin del camino, aún si m se anula.

En caso de que las raíces existan, es necesario determinar cual de las dos raíces es la solución buscada, o en su defecto en que condiciones debe utilizarse cada una. Si F_e es positiva entonces la condición que se debe cumplir es que $x > 2F_e$, pero si $F_e < 0$, entonces basta que $x > 0$. Para simplificar las expresiones se utilizan las siguientes constantes,

$$a = |F_e|\Delta p \tag{B.12}$$

$$b = v_0^2 M, \text{ quedando } x_{p,n} \tag{B.13}$$

$$x_{p,n} = \frac{6a + 2b \pm \sqrt{4b^2 + 6ab}}{3\Delta p} \text{ y la condición para que exista la solución} \tag{B.14}$$

$$2b > 3a, \text{ cuando } F_e < 0. \tag{B.15}$$

A continuación se hace un análisis sobre cada raíz para determinar su validez.

Si $F_e > 0$ entonces es necesario que $x_n > 2F_e$. Por lo tanto la expresión, quedará

$$\begin{aligned}
x_n &> 2F_e, \\
6a + 2b - \sqrt{4b^2 + 6ab} &> 6a, \\
4b^2 &> 4b^2 + 6ab.
\end{aligned}$$

Esta última expresión será siempre falsa. Si ahora consideramos, $F_e < 0$ entonces es necesario cumplir con la condición de que $x_n > 0$ y además se debe tener en cuenta que $2b > 3a$. Trabajando esta inecuación se obtiene que,

$$\begin{aligned}
x_n &> 0, \\
-6a + 2b - \sqrt{4b^2 - 6ab} &> 0, \\
2b - 6a &> \sqrt{4b^2 - 6ab}.
\end{aligned}$$

Será necesario suponer que $b > 3a$ para continuar, ya que de lo contrario la expresión es falsa. Entonces elevando ambos miembros al cuadrado y trabajando las expresiones resultantes se obtiene que $2a > b$. Esto es imposible si además se requiere que $b > 3a$, por lo tanto x_n no será mayor a cero. Resumiendo, x_n nunca es una solución válida.

El análisis anterior ahora se repite para x_p , así que en el caso de que $F_e > 0$ y se debe probar que $x_p > 2F_e$. Las expresiones quedarán,

$$\begin{aligned}
x_p &> 2F_e, \\
6a + 2b + \sqrt{4b^2 + 6ab} &> 6a, \\
2b + \sqrt{4b^2 + 6ab} &> 0,
\end{aligned}$$

lo cual siempre se verifica. Si se considera que $F_e < 0$, se debe probar que $x_p > 0$,

teniendo en cuenta que $2b > 3a$. En este casos las expresiones son

$$\begin{aligned} x_p &> 0, \\ -6a + 2b + \sqrt{4b^2 - 6ab} &> 0, \\ \sqrt{4b^2 - 6ab} &> 2b - 6a. \end{aligned}$$

Si $b < 3a$ esta última inecuación será siempre cierta. Caso contrario, elevando ambos miembros al cuadrado y trabajando con las expresiones se llega a que $b > 2a$ que será siempre cierto por que una de las hipótesis era que $b > 3a$.

Resumiendo, la solución a la Ecuación (B.8) es $x = x_p$, verificando que $2v_0^2M > 3|F_e|\Delta p$ en el caso de que $F_e < 0$. Por lo que la pendiente con la que debe frenar el camión líder para llegar al fin del camino con velocidad cero,

$$m = \frac{(x - 2F_e)x}{2v_0M} \text{ donde } x \text{ es,} \quad (\text{B.16})$$

$$x = \frac{2(3F_e\Delta p + v_0^2M) + \sqrt{6F_e\Delta pMv_0^2 + 4v_0^4M^2}}{3\Delta p}, \quad (\text{B.17})$$

siempre que $F_e > 0$ o, en caso contrario, cuando $2v_0^2M > 3|F_e|\Delta p$.

Apéndice C

Pendiente de freno de un camión seguidor

El camión seguidor debe frenar, de ser necesario, para prevenir colisionar con el vehículo que tiene en frente. Si se supone que ambos vehículos se mueven bajo la Regla 3 entonces la función $f(t)$ de la Ecuación (2.27) expresa como será la diferencia en las posiciones en función del tiempo. Por comodidad la misma se reproduce a continuación.

$$f(t) = \Delta p_a + \frac{m_a t^3}{6M_b M_f} + \frac{\Gamma t^2}{2M_f M_b} - \Delta v_0 t \quad (\text{C.1})$$

donde,

$$m_a = m_b M_f + m_{cf} M_b \quad (\text{C.2})$$

$$\Gamma = F_{ef} M_b - F_{eb} M_f \quad (\text{C.3})$$

$$\Delta p_a = p_f - p_b - l_t \quad (\text{C.4})$$

$$\Delta v_0 = v_b - v_f. \quad (\text{C.5})$$

Las variables identificadas con el subíndice b corresponden al camión seguidor bajo consideración, mientras que aquellas que tienen el subíndice f corresponden al camión que está andando inmediatamente enfrente de b . El objetivo de éste apéndice es calcular m_b (positiva puesto a que el signo se hizo explícito) de tal forma de garantizar que $f(t) > 0$ para todo $t > 0$. Esto es equivalente a calcular la pendiente con a que debe frenar el camión b , para asegurarse de no colisionar con el camión f , siempre que ambos se estén moviendo con la Regla 3 de movimiento.

Para analizar $f(t)$ correctamente es necesario tener en cuenta los signos que pueden tomar los coeficientes. El signo de Γ no está restringido. Cuando el vehículo de enfrente está yendo a menor velocidad que el trasero, Δv_0 es positivo y es el caso que más probablemente traerá una colisión. El caso de Δv_0 negativo implica que el camión de enfrente está viajado a mayor velocidad, sin embargo es posible que m_{cf} sea negativa y por ende que en el futuro exista una colisión. Por lo tanto este caso debe ser analizado igualmente. La diferencia de posiciones Δp_a deberá ser siempre mayor a cero ya que en caso contrario ya hubo una colisión.

El signo de m_a puede suponerse positivo sin pérdida de generalidad. Uno de los requerimientos es que m_b sea positivo, ya que su signo se consideró al escribir $f(t)$. Por lo tanto, de la Ecuación (C.2) se desprende que la condición para que m_a sea positivo es que $m_b > -m_{cf} \frac{M_b}{M_f}$. Esta inecuación siempre podrá ser satisfecha. Sin embargo, si

se permite $m_a < 0$ entonces se deberá verificar que $m_b < -m_{cf} \frac{M_b}{M_f}$, lo que sólo es posible si m_{cf} es negativo. Por lo tanto se considerará que $m_a > 0$, dado que simplifica enormemente los cálculos y las soluciones descartadas no afectan los objetivos.

La función $f(t)$ es un polinomio cúbico, por lo tanto tendrá un máximo y mínimo o no tendrá extremos. El análisis comienza encontrando los tiempos en los cuales ocurren, de existir, el máximo y el mínimo de la función. Para ello se calculan las derivadas,

$$\frac{df}{dt} = \frac{m_a t^2}{2M_f M_b} + \frac{\Gamma t}{M_f M_b} - \Delta v_0, \quad (\text{C.6})$$

$$\frac{d^2 f}{dt^2} = \frac{m_a t}{M_f M_b} + \frac{\Gamma}{M_f M_b}. \quad (\text{C.7})$$

Resolviendo la ecuación cuadrática se obtienen las expresiones de los tiempos,

$$t_{p,n} = \frac{-\Gamma \pm \sqrt{\Gamma^2 + 2m_a M_f M_b \Delta v_0}}{m_a}, \quad (\text{C.8})$$

los cuales son reemplazados en la segunda derivada para comprobar la naturaleza de los puntos críticos, teniendo así

$$\left. \frac{d^2 f}{dt^2} \right|_{t_{p,n}} = \frac{\pm \sqrt{\Gamma^2 + 2m_a M_f M_b \Delta v_0}}{m_a}. \quad (\text{C.9})$$

El discriminante de la Ecuación (C.6) es $\Gamma^2 + 2m_a M_f M_b \Delta v_0$. Por lo tanto la $f(t)$ tendrá un máximo y un mínimo siempre que Δv_0 sea positivo. En caso contrario aparece una nueva restricción sobre m_a para que el discriminante sea positivo,

$$m_a \leq \frac{\Gamma^2}{2|\Delta v_0| M_f M_b}. \quad (\text{C.10})$$

Mientras el discriminante sea no negativo, de la Ecuación (C.9) se puede ver que t_p será un mínimo de $f(t)$ mientras que t_n será un máximo. Entonces, para garantizar que

se evite la colisión bastará con asegurarse que el mínimo de $f(t)$ sea mayor a cero.

Si el tiempo en el cual ocurre un mínimo es una magnitud negativa ($t_p < 0$) entonces como $f(t)$ posee el coeficiente cúbico positivo, $f(t)$ será monótonamente creciente para $t > 0$. Por lo tanto antes de seguir se deben ver bajo que condiciones t_p de la Ecuación C.8 es positivo. La condición para que esto suceda es,

$$-\Gamma \geq -\sqrt{\Gamma^2 + 2m_a M_f M_b \Delta v_0}. \quad (\text{C.11})$$

La condición de la Inecuación (C.11) será cierta siempre que $\Gamma \leq 0$ o $\Gamma > 0$ con $\Delta v_0 > 0$. Si $\Delta v_0 \leq 0$ y $\Gamma \geq 0$ esto hace que todos los coeficientes de $f(t)$ sean positivos, por lo que la función será monótonamente creciente. En este caso la solución al problema es $m_a > 0$. En el resto de los casos t_p existe y es positivo.

Entonces, se desea calcular m_a (de donde se despeja m_b) tal que $f(t_p) > 0$. De forma similar al procedimiento del Apéndice B, se presenta una variable auxiliar para simplificar las expresiones resultantes. Sea

$$u = -\Gamma + \sqrt{\Gamma^2 + 2m_a M_f M_b \Delta v_0}, \text{ se puede escribir } m_a \text{ y } t_p \text{ como} \quad (\text{C.12})$$

$$m_a = \frac{u(u + 2\Gamma)}{2\Delta v_0 M_f M_b} \text{ y} \quad (\text{C.13})$$

$$t_p = \frac{2\Delta v_0 M_f M_b}{u + 2\Gamma}. \quad (\text{C.14})$$

La variable u deberá ser estrictamente mayor a cero, ya que es el numerador de t_p . De esta forma $f(t_p) > 0$ queda de la forma,

$$\frac{3\Delta p_a u^2 + 4(3a - b)u + 6\Gamma(2a - b)}{3(u + 2\Gamma)^2} > 0, \quad (\text{C.15})$$

donde,

$$a = \Delta p_a \Gamma \text{ y}$$

$$b = M_f M_b \Delta v_0^2.$$

El denominador de la Ecuación (C.15) será siempre positivo por lo que el signo será necesario analizarlo en el numerador. El mismo es una ecuación de segundo orden, donde el coeficiente cuadrático es siempre positivo. Por lo tanto, el numerador será positivo en los intervalos $(-\infty, u_1)$ y (u_2, ∞) , donde u_1 es la menor de las dos raíces mientras que u_2 es la mayor. La expresión de ambas (denominadas u_p y u_n) es

$$u_{p,n} = \frac{-2(3a - b) \pm \sqrt{4b^2 - 6ab}}{3\Delta p_a}. \quad (\text{C.16})$$

A continuación se analizan todas las combinaciones de signos de las constantes con el objetivo de hallar una solución a la inecuación $f(t_p) > 0$ en función de u .

Caso: $\Gamma \geq 0$ y $\Delta \mathbf{v}_0 > 0$ Este caso implica que $a \geq 0$. Si $2b < 3a$ entonces $u_{p,n}$ serán imaginarias. Por lo tanto, la Inecuación (C.15) se cumplirá trivialmente con $u > 0$.

Se supone, ahora, que $2b > 3a$. La condición para que u_n sea mayor a cero es $-2(3a - b) > \sqrt{4b^2 - 6ab}$. Si se supone que $3a > b$ esta inecuación es falsa ya que se estaría afirmando que un valor negativo es mayor que un valor positivo. En el caso contrario, $3a < b$ es posible elevar al cuadrado ambos términos y se termina con la condición de $2a > b$ que se contradice con que $3a < b$. En conclusión, $u_n < 0$ y por ende no afectará a la solución en este caso.

La condición para que $u_p > 0$ es $\sqrt{4b^2 - 6ab} > 2(3a - b)$. Esto será siempre cierto si $3a < b$. En caso contrario, elevando al cuadrado ambos miembros se obtiene la condición $2a < b$. Por lo tanto, u_p será positiva si y sólo si $2a < b < 3a$ o si $b > 3a$. Lo que implica que la solución a la Inecuación (C.15) es $u > u_p$ cuando $b > 2a$. Si $b < 2a$ entonces las

dos raíces son negativas lo que implica, nuevamente, que la Inecuación (C.15) se cumplirá trivialmente con $u > 0$ y el resultado será $m_a > 0$.

Caso: $\Gamma < 0$. En este caso $a < 0$, por lo que su signo se hará explícito. El discriminante de la Ecuación (C.16) será siempre positivo. Sin embargo el análisis cambia dependiendo del signo de Δv_0 .

En el caso de que $\Delta v_0 > 0$, el mínimo valor de u , dado por la Ecuación (C.12), es de $2|\Gamma|$. Por lo tanto es necesario garantizar que $u_p > 2|\Gamma|$. Esto es equivalente a $2(3|a| + b) + \sqrt{4b^2 + 6|a|b} > 6|a|$, lo que implica que $2b + \sqrt{4b^2 + 6|a|b} > 0$ lo que siempre es cierto. Al analizar $u_n > 2|\Gamma|$ se obtiene que $2b > \sqrt{4b^2 + 6|a|b}$, elevando ambos miembros al cuadrado y simplificando los términos $4b^2$ se obtiene $0 > 6|a|b$, lo que no es verdad. Por lo tanto la única solución viable es $u > u_p$.

En el caso de que $\Delta v < 0$, el mínimo valor de u es de $|\Gamma|$ y valor máximo será $2|\Gamma|$, de acuerdo a la Ecuación (C.12). Esta condición se puede expresar para ambas raíces como $0 < 3|a| + 2b \pm \sqrt{4b^2 + 6|a|b} < 3|a|$. Para el caso de u_p se tiene que $2b + \sqrt{4b^2 + 6|a|b} < 0$ lo que es falso. Analizando la cotas superior de u_n , ésta se reescribe como $2b - \sqrt{4b^2 + 6|a|b} < 0$ que es equivalente a $4b^2 < 4b^2 + 6|a|b$, lo que es verdadero. Para verificar la cota inferior se tiene que $\sqrt{4b^2 + 6|a|b} < 3|a| + b$ lo cual es equivalente a verificar que $0 < 9a^2 + 6|a|b$ lo cual es siempre verdadero. Por lo tanto la solución es $u > u_n$.

Caso: $\Delta v_0 = 0$ Este caso debe considerarse por separado, ya que con $b = 0$ esto implica que la Inecuación (C.15) se transforma en $\Delta p_a > 0$ lo que es siempre verdad pero no impone ninguna restricción sobre u . Como se explicó en el análisis de t_p , si $\Gamma \geq 0$ la solución es $m_a > 0$. Por lo tanto el análisis se realiza directamente sobre $f(t)$ considerando $\Delta v_0 = 0$ y considerando solamente $\Gamma < 0$. En este caso el mínimo de la función ocurre en $\frac{2|\Gamma|}{m_a}$ y el máximo es en $t = 0$. Por lo tanto requerir que $f(\frac{2|\Gamma|}{m_a}) > 0$ es equivalente a pedir que $\Delta p_a - \frac{2|\Gamma|^3}{3M_f M_b m_a^2} > 0$ lo que lleva a la condición $m_a > \sqrt{\frac{2|\Gamma|^3}{3M_f M_b \Delta p_a}}$.

En general, para hallar la solución expresada en m_a se utiliza la definición de u de la Ecuación (C.12) y se despeja m_a utilizando u_n y u_p como constantes.

En el caso de que $\Delta v_0 < 0$ y $\Gamma < 0$ existen dos condiciones que se pueden cumplir. La primera es $u > u_n$, pero también es solución hacer que $m_a > \frac{\Gamma^2}{2|\Delta v_0|M_f M_b}$. Ésta última condición sale de calcular m_a de tal forma que no se cumpla la Inecuación (C.10) ya que esto implica que no habrá un mínimo y que $f(t)$ será monótonamente creciente ya que sus coeficientes serán todos positivos. Ésta última solución no depende de la distancia entre los vehículos. Toda la información que aporta es que si se frena con suficiente fuerza no hay posibilidad de choque. Por tal motivo es mas interesante la solución en la cual

$$\frac{u_n(2|\Gamma| - u_n)}{2|\Delta v_0|M_f M_b} < m_a < \frac{\Gamma^2}{2|\Delta v_0|M_f M_b}. \quad (\text{C.17})$$

El problema es que esta solución no siempre es factible ya que es necesario pedir que $m_{cf}M_b < \frac{\Gamma^2}{2|\Delta v_0|M_f M_b}$, por que se considera que $m_a > 0$. Si esta condición no se cumple, entonces tampoco lo hace la Inecuación (C.10) por lo que cualquier valor de m_b mayor a cero será una solución.

Como última aclaración, cabe mencionar que es posible que el cálculo del límite inferior de m_b resulte en un valor negativo al hacer la resta necesaria para despejarla a partir de m_a . Esto quiere decir que cualquier valor positivo de m_b cumple que $f(t_p) > 0$. Teniendo esto en cuenta existen cinco soluciones posibles.

$$\{\Gamma \geq 0, \Delta \mathbf{v}_0 > 0, \mathbf{b} > 2\mathbf{a}\} \text{ o } \{\Gamma < 0, \Delta \mathbf{v}_0 > 0\} \implies m_b > \text{máx} \left\{ \frac{u_p(u_p + 2\Gamma)}{2\Delta v_0 M_b M_f^2} - m_{cf} \frac{M_b}{M_f}, 0 \right\}$$

$$\{\Gamma \geq 0, \Delta \mathbf{v}_0 > 0, \mathbf{b} \leq 2\mathbf{a}\} \text{ o } \{\Gamma \geq 0, \Delta \mathbf{v}_0 \leq 0\} \implies m_b > \text{máx} \left\{ -m_{cf} \frac{M_b}{M_f}, 0 \right\}$$

$$\{\Gamma < 0, \Delta \mathbf{v}_0 < 0, m_{cf}M_b < \frac{|\Gamma|}{2|\Delta \mathbf{v}_0|M_f M_b}\} \implies m_b > \text{máx} \left\{ \frac{u_n(u_n - 2|\Gamma|)}{2\Delta v_0 M_b M_f^2} - m_{cf} \frac{M_b}{M_f}, 0 \right\}$$

$$\{\Gamma < 0, \Delta \mathbf{v}_0 < 0, m_{cf} M_b \geq \frac{|\Gamma|}{2|\Delta \mathbf{v}_0| M_f M_b}\} \implies m_b > 0$$

$$\{\Gamma < 0, \Delta \mathbf{v}_0 = 0\} \implies m_b > \max \left\{ \sqrt{\frac{2|\Gamma|^3}{3M_f^3 M_b \Delta p_a}} - m_{cf} \frac{M_b}{M_f}, 0 \right\}$$

Apéndice D

Distancia de seguridad

En la Sección 2.4.2.3 se ve que es necesario estimar cuando un vehículo está lo suficientemente cerca de otro tal que frenar no garantiza que se pueda evitar una colisión si se cambian las reglas de movimiento de alguno de los dos. Esta distancia está dada por la que recorrerá un camión antes de detenerse completamente dada su velocidad inicial (v_0) y suponiendo el movimiento bajo las reglas 1 o 2. Este apéndice calcula estas distancias.

La *distancia de seguridad de la Regla 1* o d_{s_1} se calcula despejando el Δt necesario para $\Delta v = -v_0$ de la Ecuación (2.7), teniendo en cuenta que $F_{max} = -F_{bmax}$. Este valor se reemplaza en la Ecuación (2.8) y el resultado es la magnitud que se busca. La expresión se muestra en Ecuación (D.1)

$$d_{s_1} = \frac{v_0^2 M}{2(F_{bmax} + R)} \quad (D.1)$$

Para la distancia de seguridad de la Regla 2 (d_{s_2}) se deben contemplar dos casos. Para el caso en el cual $R \neq 0$, la Ecuación (2.10) es utilizada para calcular el tiempo que se necesitará para llevar al vehículo a velocidad cero, Δt_b . Luego, se supone que la aproximación lineal se extiende para el intervalo de tiempo Δt_b y con ello las expresiones

finales serán,

$$a_b = \frac{-P_b - Rv_0}{Mv_0} \quad (\text{D.2})$$

$$\Delta t_b = \frac{MP_b}{R} \ln \left(\frac{P_b}{Rv_0 + P_b} \right) + \frac{M}{R} v_0. \quad (\text{D.3})$$

$$d_{s_2} = \frac{a_b \Delta t_b^2}{2} + v_0 \Delta t_b, \text{ Si } R \neq 0 \quad (\text{D.4})$$

La distancia proporcionada por la ecuación d_{s_2} puede llegar a ser considerablemente diferente a la real por que la aceleración que se utiliza en la ecuación de posición proviene de una aproximación válida solo para instantes de tiempo pequeños. Al estar frenando, v_0 iría disminuyendo en cada instante de tiempo, algo que en la expresión no se tiene en cuenta. Esto haría que a_b aumente en magnitud y por ende el camión frene aún mas rápido. Así que la estimación de la Ecuación (D.4) será superior a la distancia real. Por lo tanto es una expresión segura de usar ya que el error no podrá ocasionar colisiones.

El cálculo de la distancia de seguridad en el caso de $R = 0$ es directo. Despejando de la Ecuación (2.13), el tiempo necesario para llevar al vehículo a velocidad cero y reemplazando en la Ecuación (2.14) se obtiene,

$$d_{s_2} = \frac{Mv_0^3}{3P_b}, \text{ si } R = 0. \quad (\text{D.5})$$

Si las velocidades son bajas, es posible que las distancias resulten muy pequeñas. En estos casos se impone que la distancia de seguridad tenga al menos un valor mínimo d_m , el cual es un parámetro de simulación. Por lo tanto la distancia de seguridad final será,

$$d_s = \text{máx} \{d_{s_1}, d_{s_2}, d_m\}.$$

Apéndice E

Descripciones de minas ejemplo.

Para poder ver el impacto de las técnicas de despacho y de ajuste de velocidad sobre los índices de desempeño de una mina, se simularon diversas operaciones ejemplo. Las minas ejemplo 1, 2 y 3 (Secciones 5.3.1, 5.3.2 y 5.3.3 respectivamente) tienen el formato estándar mostrado en la Figura 2.1. Por lo tanto para definir las es necesario establecer la distancia y pendiente de cada arco junto con los tiempos de servicio en cada nodo. Los arcos son bidireccionales y son en bajada (pendiente negativa) dirigiéndose de un nodo de descarga a uno de carga y se consideran con la misma pendiente positiva en la dirección opuesta.

Los datos de la Mina 1 fueron extrapolados de los datos en [16], generando aleatoriamente los datos de pendiente restringiendo el módulo de la misma al 5%, teniendo en cuenta el signo como fue explicado. Los datos de las Minas 2 y 3 fueron seleccionados de forma aleatoria ajustándolos para que muestren una diversidad de situaciones, como por ejemplo, distintos tamaños de mina, distintos tiempos de viaje y tiempos de servicio.

La Tabla E.1, muestra tres cuadros con los datos que describen cada uno de los problemas.

	U_1 (90)	$U_2(90)$
L_1 (180)	1.3 (3.4 %)	3.1 (2.8 %)
L_2 (122)	3.7 (3.7 %)	2.6 (2 %)
L_3 (122)	3.5 (1.2 %)	4.4 (0.86 %)
L_4 (180)	3.3 (3.5 %)	4.2 (1.16 %)

(a) Ejemplo de Sección 5.3.1

	U_1 (120)	$U_2(120)$
L_1 (150)	4.4 (4 %)	3 (0.9 %)
L_2 (150)	4.3 (2.4 %)	2.9 (2.2 %)
L_3 (150)	4 (3.2 %)	2.7 (3.5 %)

(b) Ejemplo de Sección 5.3.2

	U_1 (146)	U_2 (105)	U_3 (64)
L_1 (125)	3.5 (0.7 %)	2.4 (2.1 %)	2.0 (4.6 %)
L_2 (76)	2.7 (4 %)	2.5 (4.8 %)	3.3 (3.3 %)
L_3 (101)	1.7 (0.2 %)	2.5 (4.2 %)	3.8 (4.7 %)
L_4 (120)	2.7 (3.4 %)	4 (3.8 %)	3 (3.7 %)
L_5 (139)	2.3 (2 %)	2.8 (3.3 %)	2.7 (0.9 %)

(c) Ejemplo de la Sección 5.3.3

Tabla E.1: Cuadro de distancias de las Minas 1,2 y 3. El valor del cuadro es la distancia del arco en kilómetros y el valor en paréntesis es la pendiente del mismo expresada en forma de porcentaje. Los tiempos de servicio están expresados en segundos, entre paréntesis, al lado de los nombres de los nodos.

Cada una de las filas de las tablas están identificadas como L_i y las columnas por U_j . El valor que acompaña el nombre de la fila (o columna) es el tiempo de servicio en segundos del nodo. Una celda (i, j) de una de las tablas contiene la distancia en kilómetros entre L_i y U_j . El valor entre paréntesis es la inclinación del arco expresada en porcentaje. El valor este, es negativo en la dirección $U_j \rightarrow L_i$ y positivo en la dirección opuesta.

La mina ejemplo 4 fue creada para probar otro aspecto el funcionamiento de la política de velocidad y poner vehículos que tuvieran distintos destinos en el mismo camino. La topología de la mina es idéntica a la que se ve en al Figura 4.1. Sin embargo, para poder comprobar la existencia de determinados fenómenos, también se implementó una

versión que tuviera la forma estándar. La Tabla E.2 muestra las descripciones en ambos formatos de la mina.

	U_1 (60)	U_2 (80)
$L_1(80)$	7 (2%)	4 (2.5%)
$L_2(60)$	8 (3%)	5 (1.8%)

(a) Forma estándar

Arco	Distancia (Pendiente)
(U_1) 1 \leftrightarrow 2	4 (2%)
2 \leftrightarrow 3	2 (3%)
3 \leftrightarrow 4 (L_1)	1 (3.5%)
(U_2) 5 \leftrightarrow 2	1 (2%)
3 \leftrightarrow 6 (L_2)	2 (3.5%)

(b) Forma no estándar

Tabla E.2: Distancias para la mina ejemplo 4

La Tabla E.2b muestra la descripción de la mina, que tiene 6 nodos. Los datos en la columna de arco muestran la conexión entre dos nodos adyacentes identificando cuales son los nodos de descarga (1 y 5) y cuales los de carga (4 y 6). La segunda contiene la distancia en kilómetros y la pendiente del arco correspondiente. Nuevamente los caminos en bajada son aquellos que llevan de los puntos de descarga a los de carga. Así, el camino 1,2,3,6 es en bajada mientras que el inverso (6,3,2,1) es en subida.

La Tabla E.2a muestra los datos de la mina ejemplo 4 en su forma estándar. Para que las minas fueran equivalentes las distancias entre los nodos fueron fijadas en función de las distancias totales de acuerdo a los valores de la Tabla E.2b.

Bibliografía

- [1] J. Bramel, D. Simchi-Levi, and X. Chen, *The Logic of Logistics*, 2nd ed., ser. Springer Series in Operations Research. Springer-Verlang, 2004.
- [2] S. Alarie and M. Gamache, “Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines,” *International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment*, vol. 16, no. 1, pp. 59–76, 2002. [Online]. Available: <http://www.informaworld.com/10.1076/ijsm.16.1.59.3408>
- [3] T. L. Hudson, F. D. Fox, and G. S. Plumlee, *Metal Mining and the Environment*, ser. AGI Enviromental Awareness Series. American Geological Institute, 1999.
- [4] R. F. Subtil, D. M. Silva, and J. C. Alves, “A practical approach to truck dispatch for open pit mines,” in *35th APCOM Symposium*, September 2011.
- [5] S. Onn, *Nonlinear Discrete Optimization*, ser. Zurich Lectures in Advanced Mathematics. European Mathematical Society, 2010.
- [6] M. S. Bazaraa, H. D. Sherali, and C. M. Shetty, *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [7] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.

- [8] M. Munirathinam and J. C. Yingling, “A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations,” *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environments*, vol. 8, no. 1, pp. 1–15, 1994. [Online]. Available: <http://www.informaworld.com/10.1080/09208119408964750>
- [9] J. White and O. J.P., “Computer based dispatching in mines with concurrent operating objectives,” *Mining Engineering*, pp. 1045–1054, November 1986.
- [10] F. Soumis, J. Ethier, and J. Elbrond, “Truck dispatching in an open pit mine,” *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, no. 3, pp. 115–119, 2 1989.
- [11] N. Çetin, “Open pit truck/shovel haulage system simulation,” Ph.D. dissertation, Middle East Technical University, September 2004.
- [12] V. A. Temeng, F. O. Otuonye, and J. O. Friendewey, “A nonpreemptive goal programming approach to truck dispatching in open pit mines,” *Mineral Resources Engineering*, vol. 7, no. 2, pp. 59–67, 1998.
- [13] Y. Bissiri, W. S. Dunbar, and A. Hall, “Swarm-Base Truck-Shovel dispatching system in open pit mine operations,” Department of Mining and Mineral Process Engineering, University of British Columbia, Tech. Rep., 2001.
- [14] M.-X. He, J.-C. Wei, X.-M. Lu, and Bao-Xiang, “The genetic algorithm for tuck dispatching problems in surface mine,” *Information Technology Journal*, vol. 4, no. 9, pp. 710–714, 2010.
- [15] M. Souza, I. Coelho, S. Ribas, H. Santos, and L. Merschmann, “A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem,” *European Journal of Operational Research*, no. 207, pp. 1041–1051, 2010.

- [16] S. Ercelebi and A. Bascetin, "Optimization of shovel-truck system for surface mining," *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 109, pp. 433–439, July 2009.
- [17] C. Ta, J. Kresta, J. Forbes, and H. Marquez, "A stochastic optimization approach to mine truck allocation," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 19, pp. 162–175, Sep. 2005.
- [18] A. E. Arelovich, F. Masson, O. Agamenonni, S. Worrall, and E. Nebot, "Heuristic rule for truck dispatching in open-pit mines with local information-based decisions," in *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2010.
- [19] R. Akçelik and M. Besley, "Operating cost, fuel consumption, and emission models in aasidra and aamotion," in *25th Conference of Australian Institutes of Transport Research 2003*, 2003.
- [20] CODELCO Norte, *Reglamento de Carguío y Transporte de las Minas de CODELCO Norte. R - 033*, April 2006. [Online]. Available: <http://www.cslaboral.cl/C2/Descarga/R-033.pdf>
- [21] Z. Wu, Y. Liu, and G. Pan, "A smart car control model for brake comfort," *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 42–46, March 2009.
- [22] P. Hesham Rakha and I. Lucic, "Variable power vehicle dynamics model for estimating truck accelerations," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 128, no. 5, pp. 412–419, October 2002.
- [23] S. H. Burton, "Coping with the curse of dimensionality by combining linear programming and reinforcement learning," Master's thesis, Utah State University, 2010.

- [24] S. Worrall, “Providing situation awareness in complex multi-vehicle operations,” Ph.D. diss., Australian Centre for Field Robotics, Department of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sydney, March 2009.
- [25] Q. hua GU, C. wu LU, F. ben LI, and C. yong WAN, “Monitoring dispatch information system of trucks and shovels in an open pit based on GIS/GPS/GPRS,” *Journal of China University of Mining and Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 288–292, Jun. 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B8H13-4T1Y01T-11/2/e2abed4a9a8eee91556dc275f1024d89>
- [26] O. L. Maître, M. Süßner, and C. Zarak, “Evaluation of tire wear performance,” Society of Automotive Engineers, Tech. Rep. SAE 980256, February 1998.
- [27] Komatsu. (2008, 01) Overview of komatsu 960e-1 electric drive truck. [Online]. Available: <http://www.komatsuamerica.com/trucks-960E-1>