PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

SIMULACIÓN ON-LINE PARA EL DESPACHO DE CAMIONES MINEROS EN OPERACIONES A CIELO ABIERTO

NICOLÁS EDUARDO SÁEZ MUÑOZ

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
PEDRO GAZMURI SCHLEYER

Santiago de Chile, julio, 2014

© 2014, Nicolás Eduardo Sáez Muñoz

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

SIMULACIÓN ON-LINE PARA EL DESPACHO DE CAMIONES MINEROS EN OPERACIONES A CIELO ABIERTO

NICOLÁS EDUARDO SÁEZ MUÑOZ

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

PEDRO GAZMURI SCHLEYER

ALEJANDRO MAC CAWLEY VERGARA

RAFAEL EPSTEIN NUMHAUSER

RODRIGO PASCUAL JIMÉNEZ

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, julio, 2014

A mis padres, por su apoyo y compañía

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi profesor tutor, Pedro Gazmuri, ya que sin su apoyo y consejos no hubiera sido posible la realización de esta tesis. Además de su continuo aporte durante mi desarrollo personal y profesional en mi paso por la Escuela de Ingeniería.

Agradezco a todo el equipo de Simula UC, especialmente a Pedro Halçartégaray y Pablo Senosiain, por la motivación, apoyo, comentarios y revisiones.

También agradezco al profesor Álvaro Lay, del Departamento de Ingeniería de Minería, por brindar valiosa información respecto a la industria minera y cooperar con información para la modelación de una operación minera a cielo abierto.

Quisiera agradecer a mi familia: mis padres Carlos y Coloma, mi hermano Carlos y mi nana Margarita por su apoyo durante toda mi formación académica y profesional. A mi polola Sofía, por su compañía y continuas revisiones del trabajo.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

AGRADECIMIENTOS i

ÍNDICE GENERAL ii

ÍNDICE DE TABLAS v

ÍNDICE DE FIGURAS vi

RESUMEN xi

ABSTRACT xii

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 Minería a cielo abierto 1

1.2 Transporte de material en minería a cielo abierto 5

1.3 Problema abordado 6

1.4 Simulación on-line 7

1.5 Hipótesis 10

1.6 Contribución de la tesis 10

1.7 Esquema de la tesis 11

2 MÉTODOS DE DESPACHO DE CAMIONES EN OPERACIONES A CIELO ABIERTO 12

2.1 Estrategias de despacho de camiones en minería a cielo abierto 12

2.1.1 1 camión para n palas 19

2.1.2 m camiones para 1 pala 20

2.1.3 m camiones para n palas 24

2.1.4 Otras metodologías de despacho descritas en la literatura 27

2.2 Resumen y conclusiones 30

3 ESTUDIO DE SIMULACIÓN 32
3.1 Componentes del modelo de simulación 32
3.1.1 Parámetros del modelo de simulación 34
3.1.2 Horizonte de simulación y eventos del sistema 36
3.1.3 Medidas de desempeño de la simulación 39
3.1.4 Escenarios evaluados en el estudio 39
3.1.5 Modelo de asignación de flujos de material 41
3.1.6 Resultados del modelo de asignación de flujos de material 45
4 METODOLOGÍAS DE DESPACHO PROPUESTAS 47
4.1 Simulación on-line para el despacho de camiones mineros 49
4.2 Modelo de simulación on-line 52
4.3 Métodos de despacho estudiados 53
4.3.1 Generación aleatoria de soluciones (GAS) 55
4.3.2 Técnica SRDM 58
4.3.3 SRDM Mixto 64
4.4 Calibración del modelo de simulación on-line 67
4.4.1 Generación aleatoria de soluciones (GAS) 67
4.4.2 Técnica SRDM 69
4.4.3 SRDM Mixto 78
5 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SIMULACIÓN 81
5.1 Escenario base 83
5.1.1 Métodos heurísticos 84
5.1.2 Métodos que siguen flujos de material 85
5.1.3 Métodos basados en simulación on-line 85

5.1.4 Análisis general 86
5.2 Escenario 1 100
5.2.1 Métodos heurísticos 101
5.2.2 Métodos que siguen flujos de material 101
5.2.3 Métodos basados en simulación on-line 102
5.2.4 Análisis general 102
5.3 Escenario 2 116
5.3.1 Métodos heurísticos 117
5.3.2 Métodos que siguen flujos de material 117
5.3.3 Métodos basados en simulación on-line 118
5.3.4 Análisis general 119
5.4 Escenario 3 133
5.4.1 Métodos heurísticos 134
5.4.2 Métodos que siguen flujos de material 135
5.4.3 Métodos basados en simulación on-line 135
5.4.4 Análisis general 136
6 CONCLUSIONES 150
6.1 Investigaciones futuras 153
BIBLIOGRAFÍA 154

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 2-1. Aumento de productividad por la implementación de DISPATCH® - fuente: White y Olson (1992) 13
Tabla 3-1. Distancias entre los sitios de carga y descarga en el modelo de simulación. . 35
Tabla 3-2 .Fracción de la ruta desde pala a sitio de vaciado en que los camiones suben 35
Tabla 3-3. Parámetros de la distribución probabilística para los tiempos de carga y descarga de camiones. 36
Tabla 3-4. Descripción de los escenarios a evaluar en la simulación. 40
Tabla 3-5. Resultados del modelo de asignación de flujos de material para los distintos escenarios. 46
Tabla 4-1. Comparación métodos de despacho estudiados. 54
Tabla 5-1. Métodos de despacho de camiones utilizados en el estudio. 81
Tabla 5-2. Flujos de material a acarrear desde cada pala. 82
Tabla 5-3. Resumen de resultados, escenario base. 87
Tabla 5-4. Resumen de resultados, escenario 1. 103
Tabla 5-5. Resumen de resultados, escenario 2. 120
Tabla 5-6. Resumen de resultados, escenario 3. 137

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1-1. Esquema de una mina a cielo abierto – fuente: Newman, Rubio, Caro, Weintraub y Eurek, (2010).....2
Figura 1-2. Equipos de excavación utilizados en minería a cielo abierto – fuente: Hartmann y Mutmansky, p 164 – 167.....4
Figura 1-3. Ciclo de camión en minería a cielo abierto – fuente: Burt y Caccetta (2013) 5
Figura 3-1. Esquema de la operación minera considerada en el modelo de simulación..33
Figura 3-2. Flujo de camiones de la operación minera. 34
Figura 3-3. Esquema de eventos del modelo de simulación. 38
Figura 3-4. Función de probabilidad de encontrar una pala ociosa en el sistema.....43
Figura 4-1. Esquema general del funcionamiento de la metodología de despacho propuesta. 48
Figura 4-2. Esquema de las combinaciones posibles a evaluar en el modelo de simulación on-line. 51
Figura 4-3. Eventos del modelo de simulación on-line.....53
Figura 4-4. Esquema de las decisiones de despacho del método GAS.....56
Figura 4-5. Diagrama de flujo del modelo de simulación on-line, método GAS. 57
Figura 4-6. Toma de decisiones en tiempo real basada en simulación (SRDM) – fuente: Dalal et al. (2003).....59
Figura 4-7. Diagrama de flujo del modelo de simulación on-line, técnica SRDM.....64
Figura 4-8. Esquema del funcionamiento del método SRDM Mixto. 66
Figura 4-9. Calibración del modelo de simulación on-line, generación aleatoria de soluciones.....68
Figura 4-10. Tiempo medio de cómputo por número de combinaciones evaluadas en un despacho.....69
Figura 4-11. Calibración del modelo de simulación on-line, técnica SRDM. 70
Figura 4-12. Calibración ancho de la simulación, técnica SRDM.....71
Figura 4-13. Calibración ancho de la simulación, técnica SRDM.....71

Figura 4-14. Calibración profundidad de la simulación, técnica SRDM. 73
Figura 4-15. Calibración profundidad de la simulación, técnica SRDM 73
Figura 4-16. Ley de mineral a chancado, profundidad de la simulación 1,5 horas. 74
Figura 4-17. Ley de mineral a chancado, profundidad de la simulación 3 horas. 74
Figura 4-18. Ley de mineral a chancado, profundidad de la simulación 5 horas. 75
Figura 4-19. Ley de mineral a chancado, profundidad de la simulación 7 horas. 75
Figura 4-20. Razón estéril-mineral, profundidad de la simulación 1,5 horas. 76
Figura 4-21. Razón estéril-mineral, profundidad de la simulación 3 horas. 76
Figura 4-22. Razón estéril-mineral, profundidad de la simulación 5 horas. 77
Figura 4-23. Razón estéril-mineral, profundidad de la simulación 7 horas. 77
Figura 4-24. Calibración ancho de la simulación, SRDM Mixto. 78
Figura 4-25. Calibración profundidad de la simulación, SRDM Mixto. 79
Figura 4-26. Calibración profundidad de la simulación, SRDM Mixto. 80
Figura 5-1. Movimiento de material total, escenario base. 83
Figura 5-2. Ley de mineral a chancado, MC, escenario base. 88
Figura 5-3. Ley de mineral a chancado, MDP, escenario base. 88
Figura 5-4. Ley de mineral a chancado, White y Olson (1992), escenario base. 89
Figura 5-5. Ley de mineral a chancado, Li (1990), escenario base. 89
Figura 5-6. Ley de mineral a chancado, Temeng et al. (1997), escenario base. 90
Figura 5-7. Ley de mineral a chancado, GAS, escenario base. 90
Figura 5-8. Ley de mineral a chancado, SRDM, escenario base. 91
Figura 5-9. Ley de mineral a chancado, SRDM Mixto, escenario base. 91
Figura 5-10. Razón estéril-mineral, MC, escenario base. 92
Figura 5-11. Razón estéril-mineral, MDP, escenario base 92
Figura 5-12. Razón estéril-mineral, White y Olson (1992), escenario base. 93
Figura 5-13. Razón estéril-mineral, Li (1990), escenario base. 93
Figura 5-14. Razón estéril-mineral, Temeng et al. (1997), escenario base. 94
Figura 5-15. Razón estéril-mineral, GAS, escenario base. 94
Figura 5-16. Razón estéril-mineral, SRDM, escenario base. 95

Figura 5-17. Razón estéril-mineral, SRDM Mixto, escenario base. 95
Figura 5-18. Alimentación a chancador, MC, escenario base.....96
Figura 5-19. Alimentación a chancador, MDP, Escenario Base. 96
Figura 5-20. Alimentación a chancador, White y Olson (1992), escenario base. 97
Figura 5-21. Alimentación a chancador, Li (1990), escenario Base. 97
Figura 5-22. Alimentación a chancador, Temeng et al. (1997), escenario base. 98
Figura 5-23. Alimentación a chancador, GAS, escenario base. 98
Figura 5-24. Alimentación a chancador, SRDM, escenario base. 99
Figura 5-25. Alimentación a chancador, SRDM Mixto, escenario base. 99
Figura 5-26. Movimiento de material total, escenario 1. 100
Figura 5-27. Ley de mineral a chancado, MC, escenario 1. 104
Figura 5-28. Ley de mineral a chancado, MDP, escenario 1. 104
Figura 5-29. Ley de mineral a chancado, White y Olson (1992), escenario 1. 105
Figura 5-30. Ley de mineral a chancado, Li (1990), escenario 1. 105
Figura 5-31. Ley de mineral a chancado, Temeng et al. (1998), escenario 1. 106
Figura 5-32. Ley de mineral a chancado, GAS, escenario 1. 106
Figura 5-33. Ley de mineral a chancado, SRDM, escenario 1. 107
Figura 5-34. Ley de mineral a chancado, SRDM Mixto, escenario 1. 107
Figura 5-35. Razón estéril-mineral, MC, escenario 1. 108
Figura 5-36. Razón estéril-mineral, MDP, escenario 1. 108
Figura 5-37. Razón estéril-mineral, White y Olson (1992), escenario 1. 109
Figura 5-38. Razón estéril-mineral, Li (1990), escenario 1. 109
Figura 5-39. Razón estéril-mineral, Temeng et al. (1997), escenario 1. 110
Figura 5-40. Razón estéril-mineral, GAS, escenario 1. 110
Figura 5-41. Razón estéril-mineral, SRDM, escenario 1. 111
Figura 5-42. Razón estéril-mineral, SRDM Mixto, escenario 1 111
Figura 5-43. Alimentación a chancador, MC, escenario 1. 112
Figura 5-44. Alimentación a chancador, MDP, escenario 1. 112
Figura 5-45. Alimentación a chancador, White y Olson (1992), escenario 1. 113

Figura 5-46. Alimentación a chancador, Li (1990), escenario 1. 113
Figura 5-47. Alimentación a chancador, Temeng et al. (1997), escenario 1. 114
Figura 5-48. Alimentación a chancador, GAS, escenario 1. 114
Figura 5-49. Alimentación a chancador, SRDM, escenario 1. 115
Figura 5-50. Alimentación a chancador, SRDM Mixto, escenario 1. 115
Figura 5-51. Movimiento de material total, escenario 2. 116
Figura 5-52. Ley de mineral a chancado, MC, escenario 2. 121
Figura 5-53. Ley de mineral a chancado, MDP, escenario 2. 121
Figura 5-54. Ley de mineral a chancado, White y Olson (1992), escenario 2. 122
Figura 5-55. Ley de mineral a chancado, Li (1990), escenario 2. 122
Figura 5-56. Ley de mineral a chancado, Temeng et al. (1997), escenario 2. 123
Figura 5-57. Ley de mineral a chancado, GAS, escenario 2. 123
Figura 5-58. Ley de mineral a chancado, SRDM, escenario 2. 124
Figura 5-59. Ley de mineral a chancado, SRDM Mixto, escenario 2. 124
Figura 5-60. Razón estéril-mineral, MC, escenario 2. 125
Figura 5-61. Razón estéril-mineral, MDP, escenario 2. 125
Figura 5-62. Razón estéril-mineral, White y Olson (1992), escenario 2. 126
Figura 5-63. Razón estéril-mineral, Li (1990), escenario 2. 126
Figura 5-64. Razón estéril-mineral, Temeng et al. (1997), escenario 2. 127
Figura 5-65. Razón estéril-mineral, GAS, escenario 2. 127
Figura 5-66. Razón estéril-mineral, SRDM, escenario 2. 128
Figura 5-67. Razón estéril-mineral, SRDM Mixto, escenario 2. 128
Figura 5-68. Alimentación a chancador, MC, escenario 2. 129
Figura 5-69. Alimentación a chancador, MDP, escenario 2. 129
Figura 5-70. Alimentación a chancador, White y Olson (1992), escenario 2. 130
Figura 5-71. Alimentación a chancador, Li (1990), escenario 2. 130
Figura 5-72. Alimentación a chancador, Temeng et al. (1997), escenario 2. 131
Figura 5-73. Alimentación a chancador, GAS, escenario 2. 131
Figura 5-74. Alimentación a chancador, SRDM, escenario 2. 132

Figura 5-75. Alimentación a chancador, SRDM Mixto, escenario 2. 132
Figura 5-76. Movimiento de material total, escenario 3. 134
Figura 5-77. Ley de mineral a chancado, MC, escenario 3. 138
Figura 5-78. Ley de mineral a chancado, MDP, escenario 3. 138
Figura 5-79. Ley de mineral a chancado, White y Olson (1992), escenario 3. 139
Figura 5-80. Ley de mineral a chancado, Li (1990), escenario 3. 139
Figura 5-81. Ley de mineral a chancado, Temeng et al. (1997), escenario 3. 140
Figura 5-82. Ley de mineral a chancado, GAS, escenario 3. 140
Figura 5-83. Ley de mineral a chancado, SRDM, escenario 3. 141
Figura 5-84. Ley de mineral a chancado, SRDM Mixto, escenario 3. 141
Figura 5-85. Razón estéril-mineral, MC, escenario 3. 142
Figura 5-86. Razón estéril-mineral, MDP, escenario 3. 142
Figura 5-87. Razón estéril-mineral, White y Olson (1992), escenario 3. 143
Figura 5-88. Razón estéril-mineral, Li (1990), escenario 3. 143
Figura 5-89. Razón estéril-mineral, Temeng et al. (1997), escenario 3. 144
Figura 5-90. Razón estéril-mineral, GAS, escenario 3. 144
Figura 5-91. Razón estéril-mineral, SRDM, escenario 3. 145
Figura 5-92. Razón estéril-mineral, SRDM Mixto, escenario 3. 145
Figura 5-93. Alimentación a chancador, MC, escenario 3. 146
Figura 5-94. Alimentación a chancador, MDP, escenario 3. 146
Figura 5-95. Alimentación a chancador, White y Olson (1992), escenario 3. 147
Figura 5-96. Alimentación a chancador, Li (1990), escenario 3. 147
Figura 5-97. Alimentación a chancador, Temeng et al. (1997), escenario 3. 148
Figura 5-98. Alimentación a chancador, GAS, escenario 3. 148
Figura 5-99. Alimentación a chancador, SRDM, escenario 3. 149
Figura 5-100. Alimentación a chancador, SRDM Mixto, escenario 3. 149

RESUMEN

Hoy en día, gracias a los avances tecnológicos en computación que permiten la solución de problemas complejos en tiempos razonables, surge la posibilidad de incorporar sofisticadas técnicas de investigación operativa para la resolución de estas interrogantes en tiempo real, dando lugar al uso de simulación on-line, una herramienta poderosa que permite tomar decisiones basadas en indicadores de desempeño globales del sistema considerando la aleatoriedad presente en los procesos que lo conforman.

Este trabajo se desarrolla en el contexto de la toma de decisiones para despacho de camiones en minería a cielo abierto, donde cada vez que un camión realiza una descarga de material se debe responder a la pregunta: ¿adónde debe ir este camión ahora? Aunque existen diversas metodologías descritas en la literatura para enfrentar este problema, éstas no son capaces de estimar el impacto de la presente decisión en las decisiones futuras, o no logran la precisión suficiente en las estimaciones a causa de la simplicidad de los métodos.

En este trabajo se proponen tres metodologías para el despacho de camiones basadas en simulación on-line. La primera considera la evaluación de múltiples soluciones generadas aleatoriamente; la segunda corresponde a la técnica SRDM, expuesta por Dalal, Groel y Prieditis (2003); la tercera es una combinación de ambos métodos.

Para comprobar la eficiencia de las metodologías propuestas se desarrolla un estudio de simulación, donde los resultados se miden en función de la desviación de: la ley de mineral a chancado y la razón estéril-mineral en relación a un valor objetivo, además de la tasa de alimentación a chancado alcanzado al utilizar cada método. En base a estas medidas de desempeño se demuestra la mayor precisión en la toma de decisiones lograda por los métodos basados en simulación on-line, que presentan la menor desviación en términos de los objetivos operacionales y una alimentación a chancador que supera hasta en un 11% a las metodologías más utilizadas en la industria minera.

Palabras Claves: Simulación on-line, despacho de camiones mineros

ABSTRACT

Current technological advances in computational sciences have allowed solving complex problems in reasonable time, providing the possibility of using sophisticated operational research techniques to solve operational questions on a real-time frame. This context allows the use of on-line simulation, which is a powerful tool that allows decision making based on global measures of the system performance, considering the random behavior of their processes.

This work was made in the context of decision making for truck dispatching in open-pit mining systems, where every time a truck is unloaded, the following question must be answered: Where should this truck go now? Literature presents several methodologies to face this problem. However, these methods are not able to estimate the impact that current decisions have on future ones, or at least, are not able to address this issue with the sufficient precision on the estimations, due to their simplicity.

The current study proposes three dispatching methodologies based on on-line simulation. The first, considers the evaluation of multiple randomly generated solutions; the second one is based on SRDM technique described on Dalal, Groel and Prieditis (2003); and the last one is a mix of the previous two.

To test the efficiency of the proposed methodologies, a simulation study was made. The efficiency is measured by the deviation of ore grade destined to the crusher, the waste-ore ratio deviation related to specific operational targets, as well as the ore production rate achieved using each methodology. Based on these performance measures, the greatest precision was achieved by on-line simulation methods, which also present less deviations from operational targets and an ore production rate that is up to 11% higher compared to the results obtained from the most used dispatching methodologies on mining industry.

Keywords: On-line simulation, mining-truck dispatching techniques

1 INTRODUCCIÓN

El aumento de la competitividad en el sector minero y la inminente baja del precio de los *commodities*, ha generado incertidumbre respecto a la rentabilidad de ciertas empresas mineras. Dicho esto, y considerando la gran inversión extranjera en proyectos mineros en Chile durante las dos últimas décadas, con un crecimiento promedio de 11% anual en la década de 1990 (Jara, Pérez y Villalobos, 2010), surgen importantes oportunidades de investigación y desarrollo de tecnologías que favorezcan la organización y control de los procesos involucrados, con el objetivo de disminuir los costos de operación y mejorar los resultados operacionales.

En minería, el proceso productivo, a grandes rasgos, se compone de dos etapas: la extracción y los procesos de concentración de mineral y/o fundición. El primero, básicamente, corresponde a remover el mineral de la mina, cargarlo en equipos de transporte y llevarlo hacia donde comienza el proceso de concentración. El segundo, corresponde a la separación de la materia valiosa del mineral sin ley, y contempla los procesos de chancado, molienda, tratamientos químicos, entre otros procesos físico-químicos asociados a la obtención del material valioso.

El presente trabajo se enfoca en potenciar uno de los aspectos más relevantes en cuanto a costos en una operación minera a cielo abierto, el transporte de material, que captó el interés de los investigadores a partir de la década de 1970, con importantes contribuciones al estado del arte en años posteriores, además de la llegada al mercado de aplicaciones que apuntan a resolver este tema a través de la decisión óptima y en tiempo real del despacho de los camiones.

1.1 Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto es el proceso de extracción de un depósito mineral cercano a la superficie, típicamente metálico o no metálico. Este método permite la producción de recursos minerales a bajo costo que hacen posible acceder a la extracción de depósitos metálicos con leyes que decrecen en el tiempo. Además, da

lugar a la utilización de sistemas mecanizados con equipos de producción masiva, siendo una actividad intensiva en capital (Hartmann y Mutmansky, p 182 – 183).

El esquema de la Figura 1-1 muestra una típica mina a cielo abierto de explotación de minerales metálicos, como depósitos de minerales de cobre. La excavación se realiza mediante la construcción de bancos (*bench*), que permiten el avance en profundidad manteniendo la estabilidad geotécnica de las paredes de la mina. La sobre excavación (*overburden*) se refiere al material que debe ser excavado para dar acceso al mineral con leyes económicamente atractivas (*Ore*). El acarreo de material dentro de la mina requiere de rampas de acceso (*ramp*) y caminos (*haulage road*) que permitan la circulación de los equipos de transporte entre los distintos sectores.

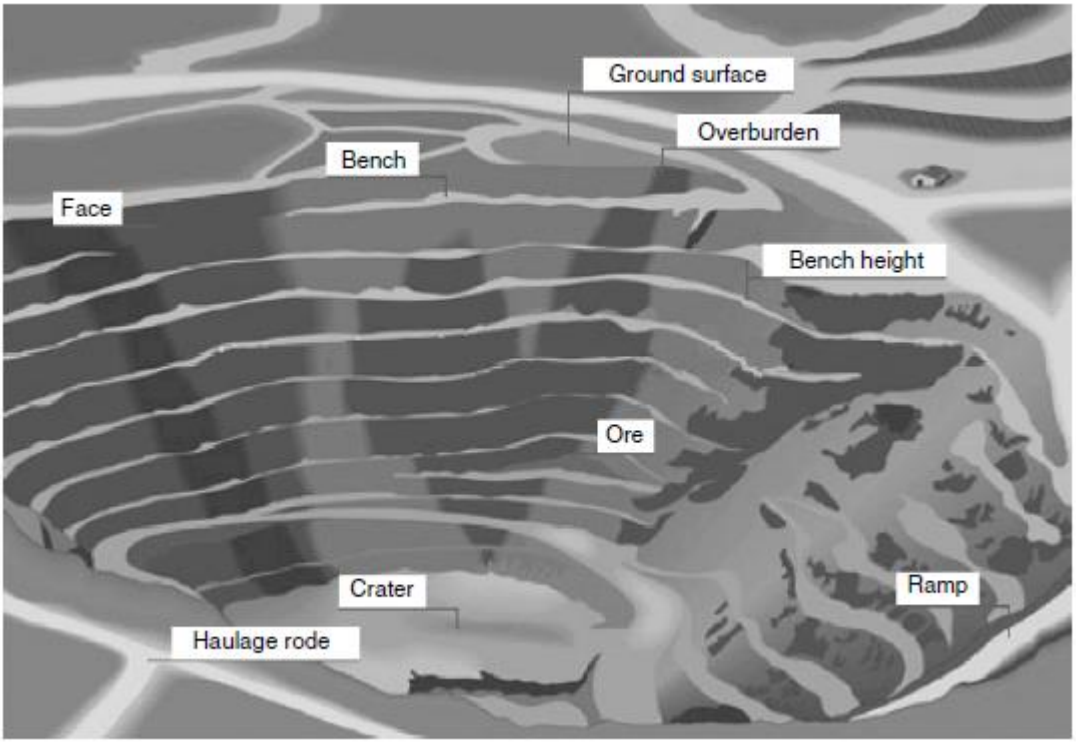


Figura 1-1. Esquema de una mina a cielo abierto – fuente: Newman, Rubio, Caro, Weintraub y Eurek, (2010).

El ciclo de producción utiliza operaciones unitarias que generalmente involucran: perforación, tronadura, carguío y transporte.

En minería a cielo abierto, los pozos de tronadura son construidos por una máquina perforadora con taladros rotativos o de percusión, donde se insertan y detonan explosivos con la finalidad de llevar el sobre-tamaño de material a un calibre adecuado para ser excavado. El material fracturado es cargado por palas, dragas o cargadores frontales en los equipos de acarreo, generalmente camiones, para ser transportado a la planta concentradora de mineral o depósitos de material estéril, es decir, sin leyes que permitan su concentración y comercialización (Hartmann y Mutmansky, p 14 – 15).

La Figura 1-2 muestra 6 de los equipos de excavación generalmente utilizados en minería a cielo abierto. Dos de ellos: draga (a) y pala de *stripping* (b) tienen la particularidad de llevar el material excavado directamente a su destino, sin la necesidad de utilizar equipos de transporte. El resto de los equipos: pala de cables (c); cargador frontal (d); pala hidráulica (e); y excavadora de rueda de cangilones (f), requieren de otros equipos para el acarreo del material a su destino final. Es importante mencionar que el tipo de depósito mineral, la profundidad de la excavación, y la tasa de producción de la mina son factores determinantes de la elección del sistema de excavación a utilizar (Hartmann y Mutmansky, p 164 – 167).

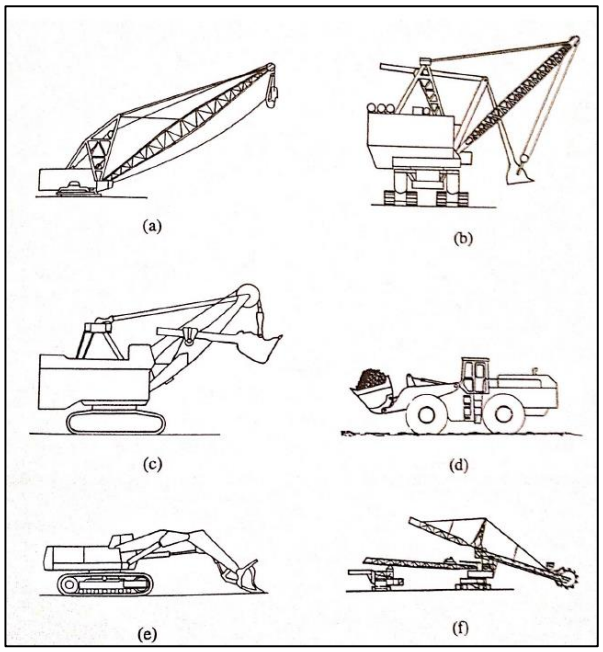


Figura 1-2. Equipos de excavación utilizados en minería a cielo abierto – fuente: Hartmann y Mutmansky, p 164 – 167.

El ciclo de los equipos de transporte en minería a cielo abierto comprende las etapas de carga, viaje a sitio de vaciado, descarga, viaje a sitio de carga, espera en cola y posicionamiento (o aculatado), para ser nuevamente cargado. El tiempo que toma un ciclo de camión se mide considerando todas las etapas mencionadas. La Figura 1-3 muestra de manera esquemática el ciclo de un camión.

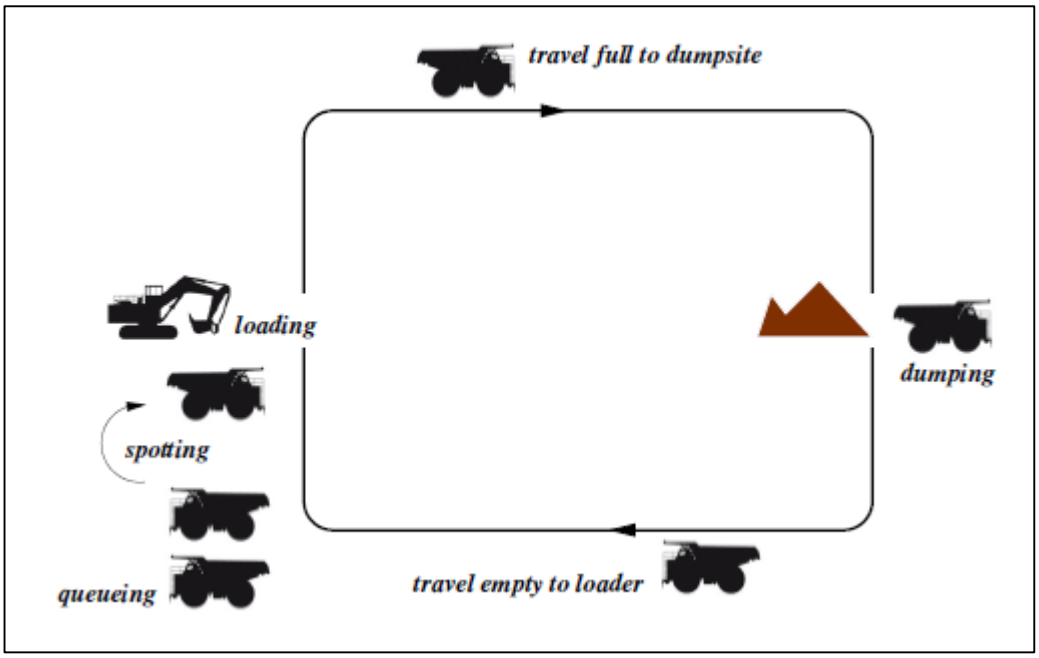


Figura 1-3. Ciclo de camión en minería a cielo abierto – fuente: Burt y Caccetta (2013)

1.2 Transporte de material en minería a cielo abierto

El transporte de material es uno de los más importantes aspectos en una operación minera a cielo abierto, llegando a representar alrededor del 50% de los costos operacionales e incluso el 60% según algunos autores (Alarie y Gamache, 2002).

De cierto modo, una operación minera puede ser representada como una red de transporte: las palas o puntos de carguío como nodos oferentes, los sitios de vaciado como nodos demandantes y las rutas entre estos puntos como los arcos del sistema. Bajo este punto de vista, y como definen Alarie y Gamache (2002), el problema de despacho de camiones en minas a cielo abierto consiste en responder a la pregunta: "¿adónde debe ir este camión ahora?" cada vez que un camión abandona un nodo de la red. En respuesta, se persiguen dos objetivos para enfrentar el problema de despacho de camiones: aumentar la productividad y reducir los costos de operación.

El despacho de camiones en una mina a cielo abierto es un problema en que las decisiones de asignación de los camiones deben ser tomadas en tiempo real. Tal como ocurre en otras industrias, el correcto modelamiento de la incertidumbre de los procesos resulta crucial, considerando los eventos impredecibles como las fallas de equipos, condiciones climáticas y errores humanos que pueden resultar en colas de camiones o palas ociosas. También resultan inciertos los tiempos de carga, descarga y viajes entre los distintos sitios de la mina, los que varían a lo largo de un turno de operación y pueden ser representados con una función de densidad de probabilidades. De esta forma, este problema puede ser clasificado como un problema estocástico, en que la incertidumbre debe ser parte del modelamiento y considerada en su resolución. Sin embargo, este aspecto del problema no se incluye en la mayoría de los actuales sistemas de despacho (Sousa, 2010).

1.3 Problema abordado

Este trabajo aborda el problema de despacho de camiones en minería a cielo abierto, mirado desde una perspectiva global, que permite enfocar esfuerzos en la mejora de diferentes aspectos de la operación minera, basado en novedosas técnicas de investigación operacional. Dicho enfoque, permite minimizar la desviación de la explotación de mineral con respecto al plan minero y mantener estable la ley del mineral que alimenta la planta concentradora, sin descuidar la productividad operacional.

Hoy en día, el control de la mayoría de los sistemas de gran maquinaria, incluyendo los mineros, son asistidos por sistemas computacionales. Los camiones son monitoreados continuamente y cada máquina tiene la capacidad de comunicarse con el centro de despacho. Además, por medio de cámaras de video, los profesionales a cargo del centro de despacho pueden observar en tiempo real, tanto los procesos en puntos estratégicos de la mina como los puntos de vaciado de material; y examinar gráficos del desempeño de la operación según ciertos parámetros (Czaplicki, 2009).

Adicionalmente, el desarrollo de tecnologías específicas para realizar las tareas de despacho está a disposición de las empresas mineras, pero debido a los altos costos que se deben incurrir, en ocasiones en lugar de adoptar dichas tecnologías, las empresas optan por hacerlo de forma manual, contratando operadores encargados de asignar los camiones al comienzo de cada turno de operación, basándose en información del pasado y su propia experiencia. De esta forma, la eficiencia en la asignación de camiones recae en la experiencia del despachador, que varía en cada turno.

Asegurar que los despachadores tengan las habilidades requeridas para lograr una asignación de camiones eficiente requiere de entrenamiento en la actividad, pero incluso en dicho caso, el entrenamiento no garantiza una asignación de camiones consistente u óptima (Ta, Ingolfsson y Doucette, 2010).

1.4 Simulación on-line

Por lo general, técnicas de simulación se enfocan en solucionar problemas de planificación de largo plazo, diseño y análisis de sistemas industriales y manufactureros, utilizando modelos que luego de obtenidos los resultados se desechan dado que ya han cumplido su función (Tavakoli, Mousavi y Komashie, 2010; Son y Wysk, 2001). Sin embargo, técnicas de simulación también han sido utilizadas para resolver problemas en tiempo real. Inicialmente aplicadas en problemas de secuenciamiento de producción en procesos de manufactura a principios de la década de 1990, esta técnica ha tenido un progreso significativo en los últimos años, siendo implementada para resolver problemas logísticos, de control de transporte, redes de datos y decisiones operacionales en tiendas por departamentos, entre otros (Schmidt y Gazmuri, 2010).

En sistemas complejos, resulta difícil estimar con exactitud el efecto de una decisión particular en el desempeño general del sistema, ya que este tipo de sistemas generalmente involucran procesos de tipo estocástico, relaciones entre distintos componentes y se insertan en un ambiente con incertidumbre. De esta forma, la toma

de decisiones en tiempo real en sistemas complejos presenta aún mayor dificultad, debido al corto tiempo que se dispone para generar una respuesta (Dalal et al., 2003). Afortunadamente, con el gran desarrollo de la potencia de los computadores personales en los últimos años, es cada vez más asequible la adopción e implementación de este tipo de tecnologías, reduciendo el tiempo que toma correr éstos modelos y realizar el análisis de output con los resultados (Smith y Brett, 1996).

El tiempo disponible para tomar una decisión varía considerablemente entre distintos sistemas productivos, dependiendo de la configuración y flexibilidad de éstos en términos de sus parámetros propios, que por ejemplo para el caso del despacho de camiones en minería a cielo abierto, depende directamente del número de camiones en operación y de los tiempos de carga, descarga y transporte de material, entre otros. Si se solicitara un despacho cada 1 hora, un tiempo de respuesta de 5 minutos podría ser útil para una aplicación de uso en tiempo real, pero si los tiempos fueran del orden de minutos o pocos segundos, como en el caso estudiado, una respuesta en tiempo real necesariamente debe ser del orden de un segundo, o prácticamente instantánea. (Harmonosky, 1995).

Aunque existen otras metodologías que apuntan a solucionar el problema del despacho de camiones en minería a cielo abierto, según se expone con mayor detalle en el Capítulo 2, sólo algunos métodos permiten evaluar el impacto de una decisión de despacho en el presente en las decisiones futuras. Asimismo, no todos los métodos son capaces de apuntar a mejorar más de una medida de desempeño a la vez; dónde las técnicas más sencillas buscan optimizar el desempeño global del sistema por medio de la mejora de variables como la utilización de los equipos o la congestión del sistema. Por otra parte, no siempre resulta efectivo la toma de decisiones mediante una misma metodología, dado que los resultados entregados por ésta pueden variar en función del estado en que se encuentre el sistema y la variabilidad en la duración de algunos procesos; de esta forma poder decidir entre qué metodología es la más apropiada antes de tomar una decisión podría resultar en

una mejora importante de las medidas de desempeño. En este contexto, la visibilidad que permite la simulación on-line sobre el resultado global al utilizar una determinada política de despacho, elimina la "miopía" y rigidez de los métodos más simples, permitiendo tomar en cuenta el impacto de cada decisión en un más largo plazo (Dalal et al. 2003).

Rogers y Gordon (1993) proponen el siguiente esquema básico para el uso de simulación on-line:

a) Inicializar el modelo de simulación con el estado actual del sistema.

b) Identificar y formular una lista de decisiones alternativas que serán evaluadas en el modelo.

c) Simular cada uno de los escenarios asociados a las alternativas definidas previamente.

d) Seleccionar la mejor alternativa, de acuerdo a una medida de desempeño establecida.

Cuando se debe tomar una decisión, se evalúa a través del modelo de simulación las consecuencias de usar una determinada regla, o compara el desempeño de un conjunto de soluciones factibles, con el objetivo de seleccionar la mejor alternativa considerando cierto criterio de evaluación. Bajo este esquema, se debe decidir la profundidad y ancho del método, el primero considerando la extensión temporal de la simulación, y el segundo, el número de réplicas de la simulación, para cada escenario, y así lograr estimadores estadísticamente significativos. Teniendo en cuenta que todo el esfuerzo computacional debe realizarse en un plazo de tiempo muy corto para que las decisiones puedan ser implementadas en una aplicación real. (Schmidt y Gazmuri, 2012).

A continuación se presenta la hipótesis bajo la que se realiza esta investigación, que se formula considerando los beneficios de utilizar simulación on-line para la toma de decisiones en tiempo real.

1.5 Hipótesis

Se plantea que con la utilización e implementación de técnicas de simulación on-line es posible mejorar el desempeño de los equipos de transporte en una operación minera a cielo abierto, con resultados de mejor calidad que los obtenidos por medio de metodologías de despacho disponibles en la literatura especializada. Se espera que el modelo desarrollado en este trabajo logre cumplir con un plan de producción minero generando una mínima desviación respecto a sus requerimientos de leyes y razón estéril-mineral.

1.6 Contribución de la tesis

Las principales contribuciones de este trabajo se resumen en los siguientes puntos:

a) Se proponen 3 metodologías de despacho de camiones en minería a cielo abierto, todas basadas en el uso de técnicas de simulación on-line.

b) Se plantea el uso de una estrategia de despacho de camiones basada en la generación aleatoria de soluciones que considera la toma de decisión en sólo una etapa, a diferencia de todos los modelos descritos en la literatura previa que se basan en técnicas con múltiples etapas de manera secuencial.

c) Se implementa la técnica SRDM propuesta por Dalal et al. (2003), en el contexto de una operación minera, considerando la utilización de métodos de despacho de camiones ampliamente discutidos en la literatura.

d) Se proponen metodologías que permiten total flexibilidad en cuanto a los objetivos que persiguen, dado por la posibilidad de prever el valor de múltiples medidas de desempeño por medio de la simulación on-line.

e) Se realiza un análisis comparativo del uso de diferentes metodologías de despacho en un modelo básico de operación de un sistema compuesto por palas y camiones, que emula la operación de una mina a cielo abierto.

1.7 Esquema de la tesis

En el Capítulo 2 se discute acerca de los métodos de despacho de camiones en operaciones mineras a cielo abierto. El Capítulo 3 describe el estudio de simulación realizado, que considera la construcción de un modelo de simulación para representar una operación minera y medir el desempeño de distintas metodologías para el despacho de camiones. En el Capítulo 4 se explican las metodologías de despacho propuestas en esta tesis: el modelo de simulación on-line y los métodos de búsqueda de soluciones para el despacho de camiones. Finalmente, en los Capítulos 5 y 6 se presentan, respectivamente, los resultados del estudio de simulación y conclusiones finales de la tesis.

2 MÉTODOS DE DESPACHO DE CAMIONES EN OPERACIONES A CIELO ABIERTO

2.1 Estrategias de despacho de camiones en minería a cielo abierto

Existe una serie de autores que presentan trabajos acerca de las diversas estrategias usadas para el despacho de camiones en minería a cielo abierto, clasifican las estrategias, analizan sus ventajas y desventajas, y proponen algunas soluciones.

Munirathinam y Yingling (1994) realizan una revisión de los métodos de despacho de camiones usados en minería a cielo abierto basados en implementaciones computacionales. Los autores comentan acerca de la evolución de los sistemas de despacho, que en sus inicios se realizaba de forma manual, con un despachador como encargado de asignar los camiones a las palas cuando éstos lo requerían, basándose en su experiencia y juicio. Desde principios de la década de los 70 se dispone de métodos con implementaciones computacionales; los primeros, basados en un sistema semi-automático de toma de decisiones, entregaban una sugerencia de despacho al despachador, quien basado en su experiencia y apoyándose en el sistema computacional decidía el próximo destino del camión. Ya a finales de la misma década se contaba con sistemas totalmente automáticos, con la capacidad de asignar directamente el destino de despacho al camión que lo solicitaba.

Los autores afirman que las compañías mineras han reportado resultados indiscutibles en aumento de productividad por el uso de sistemas de despacho computacionales. En la Tabla 2-1, se cita una tabla presentada por White y Olson (1992), donde se muestran resultados operacionales en minas alrededor del mundo que han adoptado el sistema de despacho DISPATCH®, de Modular Mining Systems.

Tabla 2-1. Aumento de productividad por la implementación de DISPATCH® - fuente: White y Olson (1992)

Mina	Ubicación	Tipo	Aumento de Productividad
Barrick Glodstrike	Nevada	Oro	15%
Bong Mine	Liberia	Fierro	10%
Bougainville Copper	PNG	Cobre	13%
Chinoe Mine	New Mexico	Cobre	13%
El Cerrejon Zona Norte	Colombia	Carbón	13%
Empire	Michigan	Fierro	10%
IOC	Newfoundland	Fierro	23%
LTV Steel Mining	Minnesota	Fierro	10%
Morenci Mining	Arizona	Cobre	10%
PD, Tyronne	New Mexico	Cobre	11%
Palabora	South Africa	Cobre	7%
Quintette Coal	British Columbia	Carbón	10%

Los autores además clasifican los sistemas de despacho en tres categorías, según el modo de obtención de solución en que están basados:

a) Reglas heurísticas: sirven como base en casos en que se trabaja sobre una operación minera grande y compleja, propensa a fluctuaciones aleatorias y difícil de modelar matemáticamente y actualizar el sistema en tiempo real sin incurrir en inmensos costos computacionales. Los sistemas de despacho basados en reglas heurísticas son fáciles de implementar y no requieren de un gran esfuerzo

de cómputo para tomar una decisión de despacho en tiempo real. A continuación se describen las heurísticas más utilizadas e investigadas en la literatura:

i) Asignación de camión fijo: cada camión se asigna a una pala y el camión se mueve en un circuito cerrado entre la pala correspondiente y un punto de vaciado. El número de camiones asignados a una determinada pala se calcula en función de ciertas medidas de desempeño propias del equipo, tales como el nivel de producción deseado, el tiempo esperado de viaje y espera por parte de los camiones. Debido a la variabilidad presente en el sistema, con frecuencia se generan largas colas de camiones en algunas palas.

ii) Minimizar el tiempo de espera de los camiones: se asigna un camión vacío a la pala que se espera genere el menor tiempo de espera para que el camión vuelva a ser despachado. Para esto se considera el tiempo esperado de viaje del camión desde su punto de despacho hasta la pala correspondiente y el tiempo requerido para cargar todos los camiones previamente asignados a esa pala, incluyendo el camión que está siendo cargado, los camiones en cola y en viaje hacia la pala en el momento del despacho. Esta estrategia intenta mejorar la utilización de los recursos de la mina. El problema de esta heurística es que resulta propensa a la generación de circuitos cortos entre las palas que se encuentran más cercanas a los puntos de vaciado, dejando subutilizadas otras palas y haciendo difícil el cumplimiento de los niveles de producción requeridos por pala, las leyes de mineral exigidas por la planta de tratamiento y la razón estéril mineral.

iii) Maximizar camiones: se asigna un camión vacío a la pala donde se espera sea cargado lo antes posible. Esta regla al igual que la anterior tiende a reducir el tiempo ocioso de los camiones y prevenir la formación de largas colas de espera, pero puede producir desbalances entre la producción de las palas.

iv) Minimizar tiempo de espera de las palas: se asigna el camión a la pala que ha esperado por más tiempo, o aquella que se espera esté disponible primero. La implementación de esta heurística tiende a mantener igualada la utilización de cada una de las palas. Existe un costo de producción asociado a su implementación, dado por el largo tiempo de viaje que requerirán algunos camiones para llegar a la pala correspondiente, incluso cuando exista otra pala ociosa cercana.

v) Maximizar la productividad momentánea del camión: se define un ratio como la capacidad del camión dividida por el tiempo de ciclo esperado y se asigna el camión a la pala que presente el mayor valor para el ratio. De esta forma, se generan circuitos indeseables entre las palas más cercanas a los camiones al momento del despacho. En caso de contar con una flota de transporte homogénea la regla se reduce a minimizar el tiempo de ciclo del camión.

vi) Minimizar la saturación de las palas: se asigna el camión a la pala que presente el menor grado de saturación. El grado de saturación se define como un ratio entre el número de camiones previamente asignados a una pala y el número deseado de camiones que debiesen ser asignados a la pala en consideración. El número deseado de camiones asignados está dado por el tiempo medio de viaje del camión entre el punto de despacho y la pala, dividido por el tiempo medio de carga para el camión en esa pala. La lógica de esta regla es obtener un tiempo relativamente constante entre las asignaciones de camiones a una pala, consistente con la capacidad de carga de la pala.

vii)Minimizar la desviación de los objetivos de producción de las palas: se asigna un camión a la pala que se encuentra más por debajo de la producción objetivo. Esta estrategia puede resultar conveniente si existen restricciones operacionales que deben cumplirse, como por ejemplo un rango de leyes de mineral exigidas por la planta de tratamiento.

Como conclusión, Munirathinam y Yingling (1994) destacan dos debilidades del uso de heurísticas para el despacho de camiones. La primera, se genera debido a que evaluar el desempeño de sólo un camión a la vez parece una estrategia miope que no puede ser totalmente justificada en términos de su optimalidad. La decisión de despacho de cada camión se toma ignorando su impacto en los despachos siguientes. La segunda, aparece al no considerar múltiples medidas de desempeño del sistema al momento de despachar un camión, siendo algunas heurísticas especialmente pobres al no ser capaces de considerar restricciones, como por ejemplo las impuestas por la planta de tratamiento de mineral.

b) Siguiendo el plan de producción: este tipo de estrategias de despacho consta de dos componentes. La primera, un modelo estacionario encargado de calcular los flujos de material entre los distintos nodos de la red para cumplir con las restricciones operacionales propias de la faena minera; y la segunda, encargada de tomar las decisiones de despacho en tiempo real, con el objetivo de cumplir con los flujos de material calculados en la etapa previa.

Además del sistema DISPATCH®, cuyo funcionamiento será explicado en la sección 2.1.2 de este capítulo, los autores comentan acerca del procedimiento de despacho propuesto por Soumis, Ethier y Elbrond (1989), que destina los camiones resolviendo un problema de asignación sobre los camiones que necesitarán ser despachados en el futuro próximo, considerando la posición de éstos y el estado de las palas, y suponiendo que existe un costo asociado de asignar cada camión a cada una de las palas, el modelo busca reducir el costo total de asignación por medio de una función objetivo que minimiza la diferencia cuadrada entre el tiempo medio de espera de los camiones y el tiempo ocioso de las palas.

c) Asignación restringida: en contraste con la estrategia anterior, un sistema de asignación restringida no busca calzar el estado actual del sistema con el preestablecido como óptimo por el modelo estacionario. En lugar de eso, esta estrategia resuelve óptimamente un problema de asignación en cada decisión de despacho que se deba realizar.

Hauck (1973) desarrolló un modelo de asignación restringida con el objetivo de maximizar la producción total minimizando la pérdida de tiempo productivo debido a tiempo ocioso de los equipos. El modelo se resuelve usando programación dinámica, donde la solución se encuentra por medio de un proceso de toma de decisiones secuenciales que terminan por asignar un camión a una pala en cada corrida. Hauck representa el problema de asignación como el de encontrar la combinación de peso mínimo en un grafo $G = (S \cup T, A)$, donde S es una colección de nodos representando a los camiones, T una colección de nodos representando a las palas y A el conjunto de arcos asociados a los pesos.

Munirathinam y Yingling (1994) concluyen sobre el trabajo de Hauck que éste contribuye significativamente a clarificar la naturaleza de los problemas de asignación, que algunos autores habían definido como combinatorialmente intratables. Sin embargo, realizan algunas críticas: primero, la aleatoriedad presente en los tiempos de ciclo de los camiones no calzan completamente en un problema de asignación; y segundo, el cumplimiento riguroso de las restricciones de producción en cada una de las decisiones de asignación podría ser no consistente con los objetivos reales de los despachadores. Violaciones por cortos períodos de tiempo a las restricciones pueden ser aceptadas y resultar en aumentos significativos en la productividad en el largo plazo.

Otra clasificación para las estrategias de despacho de camiones es la propuesta por Alarie y Gamache (2002), quienes las agrupan en tres tipos y comentan acerca de las ventajas y desventajas de cada estrategia:

a) 1 camión para n palas: cuando un camión genera un requerimiento de despacho, se consideran las n palas a las que el camión podría ser despachado y el sistema evalúa los costos o beneficios de asignarlo a cada una de las palas de acuerdo a un criterio de selección. Este procedimiento se repite cada vez que un camión requiere ser despachado. Bajo este esquema, no se considera el impacto de

la decisión de despacho en las asignaciones futuras. Esta estrategia es la más antigua y una de las más sugeridas en la literatura.

b) m camiones para 1 pala: las decisiones de despacho se toman considerando los próximos m camiones a ser despachados en el futuro cercano, pero sólo una pala. Primero, las palas son ordenadas en función de cuan por debajo de la producción calendarizada se encuentren. Considerando este orden, se asigna a la primera pala de la lista el camión que reducirá esta medida. El sistema de despacho más conocido disponible en la literatura que utiliza esta estrategia corresponde a DISPATCH®, descrito por White y Olson (1986) y White y Olson (1992).

c) m camiones para n palas: esta estrategia considera simultáneamente la asignación de los próximos m camiones a ser despachados a las n palas en operación. Esta estrategia se lleva a la práctica usando métodos de optimización combinatorial. Su principal ventaja es que permite tomar decisiones de acuerdo a una visión global del sistema, que toma en cuenta las relaciones entre los diferentes aspectos del problema. En literatura esta situación se formula como un problema de asignación o de transporte, ambos problemas clásicos de la investigación de operaciones. Como desventaja, debido a la naturaleza de la optimización combinatorial, los valores de m y n no deben ser muy grandes, ya que de otra forma los tiempos de cómputo para encontrar soluciones podrían aumentar de manera exagerada.

Los autores concluyen acerca del sistema de despacho que bajo su punto de vista resulta ideal. Indican que un sistema basado en múltiples etapas optimizantes (*Multi Stage*) entregaría mejores resultados que uno basado en una etapa simple. Los sistemas *Multi Stage* típicamente incluyen 2 etapas: la primera, que denominan *Upper Stage*, es la encargada de calcular los flujos de material entre los distintos nodos de la red, considerando las restricciones de leyes mínimas y máximas exigidas por los chancadores y su alimentación mínima, la razón estéril mineral de la mina y la capacidad operacional de las palas; la segunda, denominada *Lower Stage*, toma

como referencia la información entregada por la etapa previa para resolver el problema de despacho de camiones en tiempo real.

Un sistema de despacho debe ser capaz de adaptarse rápidamente ante cualquier cambio ocurrido en la operación de la mina, tal como la detención de una pala. La actualización del sistema debe incluir no sólo el estado actual de la mina, sino que también los eventos futuros de los que se tiene conocimiento. Adicionalmente, el continuo aumento de la capacidad y reducción de costo de los computadores, y el constante desarrollo de métodos de investigación operativa, permiten considerar de mejor manera la naturaleza combinatorial del problema de despacho de camiones integrando secuencias de decisiones. De esta manera, es posible evitar el uso de sistemas cuya formulación se basa en problemas de asignación o transporte y considerar formulaciones más generales que permitan evaluar posibles interacciones entre camiones despachados desde distintas posiciones, que puede variar de manera significativa los tiempos de espera de los camiones entre una asignación y otra.

A continuación se detallan los trabajos más relevantes encontrados según la clasificación propuesta por Alarie y Gamache (2002).

2.1.1 1 camión para n palas

Una metodología interesante que calza en esta clasificación es la propuesta por Li (1990), que consiste en una estrategia de despacho llamada "máxima desviación del tiempo entre camiones". Se define $t_{i,j}^{*}$ como el tiempo óptimo entre camiones en la ruta que une los sitios i con j, entonces:

$$t_{i,j}^{*} = \frac{1}{X_{i,j}^{*}} \tag{2-1}$$

donde $X_{i,j}^{*}$ es el flujo óptimo de camiones en la ruta i,j, medido en camiones/hora. Se define $t_{i,j}$ como el intervalo de tiempo entre el momento en que un camión solicita su despacho y el tiempo del último despacho en la ruta i,j, con esto, la desviación del tiempo entre camiones y el tiempo óptimo entre camiones es:

$$\Delta t_{i,j} = t_{i,j} - t^*_{i,j} \tag{2-2}$$

y la desviación relativa con el tiempo entre camiones es:

$$\delta_{i,j} = \Delta t_{i,j} / t^*_{i,j} \tag{2-3}$$

asignando un camión vacío situado en el sitio i al punto de carga j donde se encuentre la mayor desviación relativa.

Según los autores, la regla de la máxima desviación del tiempo entre camiones mantiene el flujo de camiones lo más cercano al óptimo como sea posible. Adicionalmente, esta regla requiere información sólo del tiempo del último despacho en cada ruta, por lo que resulta simple de evaluar.

2.1.2 m camiones para 1 pala

White y Olson (1986), y White y Olson (1992) presentan el algoritmo sobre el que opera DISPATCH®, uno de los sistemas de despacho más utilizados por la industria minera. El algoritmo se formula para maximizar la producción de mineral, minimizar el remanejo[1] de material, y cumplir con el objetivo de alimentación a planta, sujeto a las restricciones de leyes exigidas por ésta.

El algoritmo trabaja en 2 etapas, diseñadas para responder en fracciones de segundo para no causar retrasos en la operación minera.

La primera, basada en un modelo de programación lineal, entrega el flujo de material óptimo, en toneladas por hora, que debe ser acarreado desde cada pala a los puntos de vaciado que corresponda, con el objetivo de minimizar el acarreo total dentro de la mina, y considerando restricciones impuestas por la configuración de la operación, tales como el número de palas y camiones operativos, tiempos de carga y descarga

[1] Se entiende por remanejo de material la acción de descargar en un acopio no definitivo, para postergar el transporte a chancador.

de camiones, requerimientos de leyes en la alimentación a planta y prioridades en las palas. El modelo de programación lineal de DISPATCH® es resuelto por medio del método Simplex, para minimizar el total de camiones requeridos para cubrir la operación de las palas, sujeto a restricciones de:

a) Continuidad en el transporte de camiones a través de palas y sitios de descarga.

b) Tasa máxima de excavación en las palas.

c) Capacidad máxima de descarga en botaderos y chancadores.

d) Número de camiones disponibles.

e) Rango de leyes de operación de la planta de tratamiento de mineral.

f) Objetivo de acarreo de distintas categorías de material.

Este modelo debe ser ejecutado una vez al inicio del turno de operación, y cada vez que exista un cambio importante en la configuración de la mina, por ejemplo, cuando un chancador, botadero, o pala queda fuera de servicio o vuelve a estar disponible; cada vez que un camino es añadido, eliminado, abierto, cerrado, o se convierte en un camino en un solo sentido; cada vez que el tiempo total de viaje entre dos puntos varía, cada vez que cambian los requerimientos de leyes de la planta, prioridades de las palas, o capacidades de chancado o botaderos; cada vez que el número de camiones requeridos se vuelve distinto al número de camiones disponibles; y cada cierto intervalo de tiempo definido por el usuario.

La segunda etapa, basada en un método de programación dinámica, utiliza como variable de entrada el resultado para los flujos de material obtenido por medio del modelo de programación lineal. Para esto, este método busca asignar los camiones disponibles a las palas para obtener los flujos de material objetivo cada vez que un camión solicita una asignación de ruta. Se consideran como camiones disponibles todos aquellos que se encuentren descargando en un botadero, *stockpile*, o chancador, como también aquellos que se encuentren en camino desde una pala a un punto de vaciado.

El mecanismo de asignación considera dos arreglos: uno para las rutas, que contiene información del flujo óptimo a mover por cada una, el material ya movido hasta el instante en que se solicitó el despacho y el tiempo desde la última asignación de camión a esa ruta; y uno para los camiones disponibles, que contiene información del tiempo estimado en que cada camión solicitará ser asignado a una ruta. El algoritmo de despacho funciona de la siguiente manera:

a) El arreglo de rutas es ordenado según el *need-time* de cada ruta, que se calcula a partir del tiempo esperado en que la ruta requerirá una asignación de camión, se estima según la ecuación (2-4):

$$need - time_i = L_j + \frac{F_{ij} \times \left(A_j - R_j\right)}{P_i} \qquad (2\text{-}4)$$

que toma como supuesto que la ruta i alimenta a la pala j y donde:

i) $L_j =$ tiempo en que el último camión fue asignado a la pala j. Medido en horas (hr).

ii) $F_{i,j} =$ flujo de material por la ruta i sobre el total que debe ser acarreado desde la pala j. Corresponde a la fracción del flujo de material de la pala j que debe ser transportado por la ruta i. Adimensional.

iii) $A_j =$ tonelaje total de material acarreado con origen en la pala j desde el inicio de la operación hasta el instante L_j. Medido en toneladas (ton).

iv) $R_j =$ requerimiento total de acarreo desde la pala j en el turno de operación. Medido en toneladas (ton).

v) $P_i =$ flujo de material objetivo que debe ser acarreado por la ruta i. Medido en toneladas por hora (ton/hr).

b) Se selecciona la ruta con el menor *need-time*, salvo que alguna pala tenga una prioridad mayor que las otras, caso en que una ruta dependiente de esa pala será seleccionada.

c) Se busca el mejor camión para asignación, basado en la variable *lost-tons*, que se define según la ecuación (2-5):

$$lost - tons = TC\,\frac{TR}{RT}\,(TI + ET) + (SR \times SI) \tag{2-5}$$

donde:

i) $TC =$ ratio entre la capacidad del camión a ser asignado y la capacidad promedio de los camiones. Adimensional.

ii) $TR =$ tasa de excavación total de todas las palas en la mina. Medida en toneladas por hora (ton/hr).

iii) $RT =$ número total de camiones requeridos. Calculado previamente con el modelo de programación lineal.

iv) $TI =$ tiempo ocioso esperado del camión si es asignado a la pala con el menor *need-time*. Medido en horas (hr).

v) $ET =$ tiempo extra de viaje del camión descargado que se deberá realizar al asignar el camión a la pala con el menor *need-time*, respecto a lo que significaría asignarlo a la pala más cercana. Medido en horas (hr).

vi) $SR =$ suma de la tasa de material que se debe acarrear por todas las rutas de la pala con el menor *need-time*. Corresponde a la tasa de material total, medido en toneladas por hora (ton/hr) que debe remover la pala seleccionada.

vii)$SI =$ tiempo ocioso esperado de la pala con el menor *need-time* si se le asigna el camión para el que se está calculando el *lost-tons*. Medido en horas (hr).

Así, por medio de la ecuación (2-5) se estima la pérdida de eficiencia del sistema por la asignación de cada uno de los camiones a la pala que presenta el menor *need-time*. El primer factor de la ecuación representa la pérdida operacional en toneladas acarreadas debido al tiempo ocioso del camión y el tiempo extra de viaje que implica dicha asignación. El segundo factor representa la pérdida operacional asociada a la pala, también medida en toneladas, y causada por el tiempo ocioso de la pala que implica la asignación.

d) Se asigna a la pala con el menor *need-time* el camión que minimice el *lost-tons*, y se selecciona la siguiente ruta del arreglo ordenado según *need-time* para realizar el mismo procedimiento. Se repite hasta que todos los camiones hayan sido asignados y se entrega al sistema la asignación del camión que la solicitó.

Según White y Olson (1992), la lógica de asignación mejora la cobertura de las palas y minimiza el tiempo ocioso de los equipos. Además, aseguran que el método cumple con el principio de optimalidad de Bellman, que establece: "una política óptima tiene la propiedad de que, cualquiera sea el estado inicial y la decisión inicial, las decisiones restantes deben constituir una política óptima en relación con el estado resultante de la primera decisión".

2.1.3 m camiones para n palas

Temeng, Otuonye y Frendewey (1997) proponen un método de despacho de camiones en tiempo real basado en un algoritmo de transporte para lograr una asignación eficiente de los camiones, que considere el impacto de la asignación de despacho más próxima en los despachos futuros. El modelo de optimización propuesto considera un problema combinatorial que asigna los camiones a las palas buscando reducir el tiempo ocioso de los equipos.

El primer paso corresponde a determinar las palas con necesidad de asignación, lo que se estima a través de un ratio que representa la proporción entre el tonelaje movido entre una pala y un punto de vaciado y el tonelaje que debe ser movido en el turno, según la ecuación (2-6).

$$R_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{T_{i,j}} \tag{2-6}$$

donde, $x_{i,j}$ corresponde al tonelaje movido desde la pala i al punto de vaciado j en lo transcurrido del turno y $T_{i,j}$ al tonelaje total a mover desde la pala i al punto de vaciado j en el turno. A partir de este ratio se calcula la desviación $d_{i,j}$ de cada flujo de mineral respecto a lo esperado a partir de las ecuaciones (2-7) y (2-8).

$$d_{i,j} = R_{i,j} - R \tag{2-7}$$

$$R = \frac{1}{nm}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} R_{i,j} \tag{2-8}$$

De lo anterior, si una pala resulta con $d_{i,j} < 0$ entonces esa pala necesita la asignación de un camión, ya que se encuentra por debajo del material que se tiene presupuestado a mover. Para todas las palas que resulten necesitar una asignación, se calcula la demanda de camiones para obtener el flujo de material requerido para lograr el objetivo de tonelaje a mover $M_{i,j}$, que se obtiene de las ecuaciones (2-9) y (2-10), donde C representa la capacidad de carga de los camiones.

$$y_{i,j} = RT_{i,j} - x_{i,j} \tag{2-9}$$

$$M_{i,j} = \left\lceil \frac{y_{i,j}}{C} \right\rceil \tag{2-10}$$

Con esto, se calcula la demanda de camiones por pala y la demanda total, según las ecuaciones (2-11) y (2-12), respectivamente.

$$D_i = \sum_{j=1}^{m} M_{i,j} \tag{2-11}$$

$$D = \sum_{i=1}^{n} D_i \tag{2-12}$$

Una vez conocido lo anterior, se construye el conjunto S, dado por todos los camiones que resultan asignables a una pala según su posición. Así, los camiones que se encuentren en camino, en la cola o descargando en sitios de vaciado serán asignados a una pala utilizando un modelo de optimización que minimiza el tiempo ocioso total de palas y camiones:

$$Min \quad \sum_{k=1}^{l}\sum_{i=1}^{n} W_{i,k}X_{i,k}$$

S.a.

$$\sum_{i=1}^{n} X_{i,k} \leq S \qquad \forall\, k = 1, \dots, l \tag{2-13}$$

$$\sum_{k=1}^{l} X_{i,k} \geq D_i \qquad \forall\, i = 1, \dots, n \tag{2-14}$$

$$X_{i,k} \geq 0 \quad \forall\, k = 1, \dots, l \quad \forall i = 1, \dots, n \tag{2-15}$$

Donde $W_{i,k}$ representa el tiempo asociado a asignar el camión k a la pala i, dado por:

$$W_{i,k} = L_i(N_i + E_i) - \left(t_k + d_j + e_j + r_{ij}\right) \tag{2-16}$$

i) $L_i =$ Tiempo medio de carga de la pala i
ii) $N_i =$ Número de camiones en la pala i
iii) $E_i =$ Número de camiones en camino a la pala i
iv) $t_k =$ Tiempo de viaje esperado para llegar al sitio j
v) $d_j =$ Tiempo de espera esperado en el sitio j
vi) $e_i =$ Tiempo medio de descarga en el sitio j
vii)$r_{i,j} =$ Tiempo medio de viaje desde el sitio j a la pala i

Considerando esto, se busca la asignación de camiones $X_{i,k}$ que presente el menor tiempo ocioso de los equipos sin superar el número máximo de camiones a asignar y asegurando cumplir con la demanda de camiones de cada pala, según las restricciones (2-14) y (2-15), respectivamente.

2.1.4 Otras metodologías de despacho descritas en la literatura

Wang, Zhang y Chen (2006) proponen una metodología para el control y despacho de camiones basado en lo que denominan "control macroscópico", que a diferencia de otras estrategias, considera la importancia del flujo de camiones objetivo con énfasis en los sitios de descarga de material.

El método de control macroscópico indica que si uno de los flujos de camiones se desvía de manera significativa del flujo objetivo, este debe ser recuperado a tiempo y bajo costo, aproximando los valores de los flujos a los definidos previamente por un modelo de asignación de flujos y mejorando con esto el desempeño global del sistema.

Según los autores, de acuerdo a las condiciones actuales de las minas a cielo abierto, donde el número de sitios de descarga es mucho menor que el número de equipos de excavación y el flujo de camiones relacionado a cada punto de descarga es mucho mayor que el flujo de camiones relacionado a cada excavador, desde un punto de vista global del sistema de despacho, los sitios de descarga son puntos clave en la operación, y controlando el flujo de camiones en las rutas que conducen a éstos puntos es posible lograr un manejo efectivo de la operación.

Este método es el único de los estudiados que considera la posibilidad de dejar un camión detenido temporalmente, lo que ocurre en caso de que los sitios de descarga o excavadores sobrepasen cierto nivel de saturación. Para tomar las decisiones de despacho, se utiliza la metodología que se describe a continuación:

a) Primero, se calcula el intervalo objetivo de camiones para cada ruta, que determina el tiempo medio que debe transcurrir entre una asignación y otra, dado por la ecuación (2-17):

$$t = \frac{C}{X} \tag{2-17}$$

donde, C corresponde a la capacidad de carga media de los camiones en toneladas (ton) y X al flujo de material objetivo a transportar por cada ruta en toneladas por hora ($ton/hora$).

b) Se ordena el tiempo de todos los últimos camiones que fueron despachados en un arreglo la forma $t_1, t_2, t_3, \dots, t_p$, donde t_p es el tiempo de despacho del camión que solicita ser despachado.

c) Empezando por t_2, si se cumple que $t_2 - t_1 > t$, entonces t_2 no varía; si por el contrario, $t_2 - t_1 \leq t$, entonces $t_2 = t_1 + t$

d) Se repite el mismo procedimiento para $t_3, \dots, t_p$.

e) Se calcula un ratio según se define en la ecuación (2-18), que determina la relación entre el intervalo de tiempo entre camiones real y el objetivo. Mientras mayor sea el tamaño del intervalo en relación al objetivo, más tempranamente se necesita la asignación de un camión a esa ruta.

$$R = \frac{t_p - t_{p-1}}{t} \tag{2-18}$$

f) Cuando un camión vacío solicita ser despachado desde un punto de descarga, se consideran todas las rutas que salen desde ese punto, cuyo flujo de camiones objetivo sea mayor a cero y que no hayan sido consideradas saturadas por el control macroscópico. En caso de que exista una o más rutas factibles, se despacha a la que posee el mayor R; en otro caso, y siempre que la ruta cumpla con el control macroscópico, se despacha a la ruta con el menor tiempo de viaje o se detiene el camión a esperar ser despachado.

Otra alternativa interesante es la de Subtil, Silva y Alves (2011), que proponen un enfoque de despacho dinámico de camiones a través del uso de simulación discreta en tiempo real, implementado en el paquete comercial SmartMine® de Devex S.A.

Los autores distinguen dos ventajas de la heurística de despacho propuesta frente a las heurísticas presentadas en la literatura. La primera es el uso de simulación

discreta para predecir el comportamiento de la mina antes de tomar decisiones para las próximas solicitudes de despacho, eliminando el aspecto descrito por Alarie y Gamache (2002) como “miope”, donde la decisión de despacho del próximo camión no considera el efecto en los despachos siguientes. La otra ventaja es el uso de técnicas de optimización multiobjetivo para determinar la mejor combinación de despachos sin considerar sólo una medida de desempeño y descuidando otras.

El algoritmo de despacho corre cada vez que un camión requiere ser asignado. El objetivo de la asignación es maximizar la productividad de la flota de transporte, minimizar el tiempo en la cola de los camiones y minimizar el tiempo ocioso de las palas. Esta heurística sigue una estrategia m camiones para n palas.

La operación del algoritmo consiste en construir todas las posibles combinaciones de asignación para el camión que solicita ser asignado y los n próximos camiones que necesiten ser asignados, con n como un parámetro del algoritmo. Cada combinación de asignación se trata como una posible solución del problema y todas son evaluadas por el modelo de simulación.

El algoritmo corre una simulación de la operación de los camiones, usando los tiempos históricos de cada proceso en la operación como la duración de éstos en la simulación. El horizonte de la simulación comprende el período hasta que los n camiones completen su próximo ciclo de operación, luego el modelo retorna información de la producción de mineral y estéril, la productividad de la palas, la cercanía al plan de producción, el tiempo ocioso de las palas y el tiempo en cola de los camiones. Con esta información, el algoritmo selecciona la mejor solución entre todas las generadas usando técnicas de optimización multiobjetivo, que consideran todas las medidas de desempeño antes mencionadas y que serán validadas para evitar soluciones indeseables.

Luego de las etapas ya descritas el algoritmo entrega la asignación del camión solicitante. En caso de que durante la ejecución del algoritmo algún otro camión

solicite asignación, éste será asignado según la solución entregada por la solicitud de asignación anterior.

2.2 Resumen y conclusiones

Los sistemas computacionales para el despacho de camiones mineros han permitido reducir costos y aumentar la productividad en operaciones mineras dedicadas a la extracción de diferentes minerales alrededor del mundo, con aumentos documentados en la productividad de hasta un 23% (ver Tabla 2-1).

Existen distintas clasificaciones para los métodos de despacho de camiones, que los agrupan según su funcionamiento. Alarie y Gamache (2002) los agrupan en tres tipos:

a) 1 camión para n palas: este grupo incluye todas aquellas reglas heurísticas simples y fáciles de implementar, que no requieren de gran esfuerzo de cómputo para tomar una decisión de despacho en tiempo real. Este esquema no considera el impacto de la decisión de despacho en las asignaciones futuras ni múltiples medidas de desempeños. En este tipo de metodologías destaca la propuesta por Li (1990).

b) m camiones para 1 pala: este grupo considera aquellos métodos que asignan a todos los camiones prontos a ser despachados cada vez que alguno requiere ser asignado a pala. La prioridad para la selección de palas se basa en la desviación que presenten respecto al flujo de material objetivo definido previamente por medio de un modelo de programación lineal. En este tipo de metodologías destaca la propuesta por White y Olson (1992).

c) m camiones para n palas: esta estrategia se lleva a la práctica usando métodos de optimización combinatorial. Su principal ventaja es que permite tomar decisiones de acuerdo a una visión global del sistema. Como desventaja, debido a la naturaleza de la optimización combinatorial, los valores de m y n no deben ser muy grandes para evitar tiempos de cómputo exagerados. En este tipo de

metodologías destacan las presentadas por Temeng et al. (1997) y Subtil et al. (2011).

Típicamente, los sistemas de despacho más complejos incluyen 2 etapas. La primera se encarga de calcular los flujos de material entre los distintos nodos de la red, considerando restricciones de leyes de mineral exigidas por la planta concentradora y alimentación mínima a chancador, entre otras. La segunda, toma la información entregada por la etapa previa para resolver el despacho de camiones en tiempo real.

El continuo aumento de la capacidad y reducción de costo de los computadores, además del constante desarrollo de métodos de investigación operativa, permiten enfrentar de mejor manera la naturaleza combinatorial del problema de despacho de camiones. De esta manera, han surgido paquetes comerciales basados en simulación on-line, como el presentado por Subtil et al. (2011), que toma una decisión de despacho luego de evaluar un conjunto de medidas de desempeño obtenidas de la simulación de todas las combinaciones de asignación posibles para los próximos n camiones que deban ser asignados, con n definido como un parámetro del algoritmo. Sin embargo, la cantidad de soluciones que deben ser evaluadas para el despacho de un camión puede resultar exagerada. Esto, sugiere el estudio de nuevos métodos basados en simulación on-line, que a través de la exploración de una menor cantidad de soluciones permita definir el mejor destino para el despacho de los camiones.

3 ESTUDIO DE SIMULACIÓN

El estudio de simulación considera la evaluación de diferentes metodologías para el despacho de camiones por medio de un modelo de simulación discreta que representa la operación de una faena minera. Esto, con el fin de comprobar y medir el desempeño operacional al utilizar distintas estrategias de despacho para los camiones.

El modelo se simulación representa el funcionamiento de un típico sistema de acarreo minero compuesto por palas y camiones. La simulación considera la variabilidad de la duración de las operaciones de carga y descarga y no considera interrupciones operativas de ningún tipo.

Este capítulo presenta el modelo de simulación, con sus componentes, parámetros, horizonte de simulación, eventos y medidas de desempeño. Adicionalmente, describe los escenarios evaluados en el estudio, que incluyen un escenario base y tres variaciones de éste. Finalmente, presenta el modelo de asignación de flujos de material utilizado para estimar el tonelaje de material por hora a acarrear desde cada pala y la cantidad de camiones necesarios para el acarreo de éste.

3.1 Componentes del modelo de simulación

El modelo considera una operación minera en que se utilizan 5 palas, 1 chancador para la descarga de mineral, 1 botadero para la descarga de material estéril y 30 camiones para el acarreo de material. La Figura 3-1 muestra de manera esquemática la distribución espacial de la mina y sus puntos de extracción y vaciado. La mina está compuesta por 2 excavaciones, representadas en la figura por círculos dobles. En cada excavación hay palas que extraen exclusivamente mineral o estéril según corresponda. Las palas 1, 2 y 4 están dedicadas a la extracción de mineral, por lo que todos los camiones que sean cargados en ellas se dirigen necesariamente al chancador para descargar. Las palas 3 y 5 se dedican a la extracción de material estéril, por lo que todos los camiones que sean cargados en ellas, posteriormente se dirigen a descargar al botadero. En los puntos de carga y descarga existen colas de

espera para los camiones, esto se debe a que la capacidad de atención de palas, chancador y botadero es de un camión.

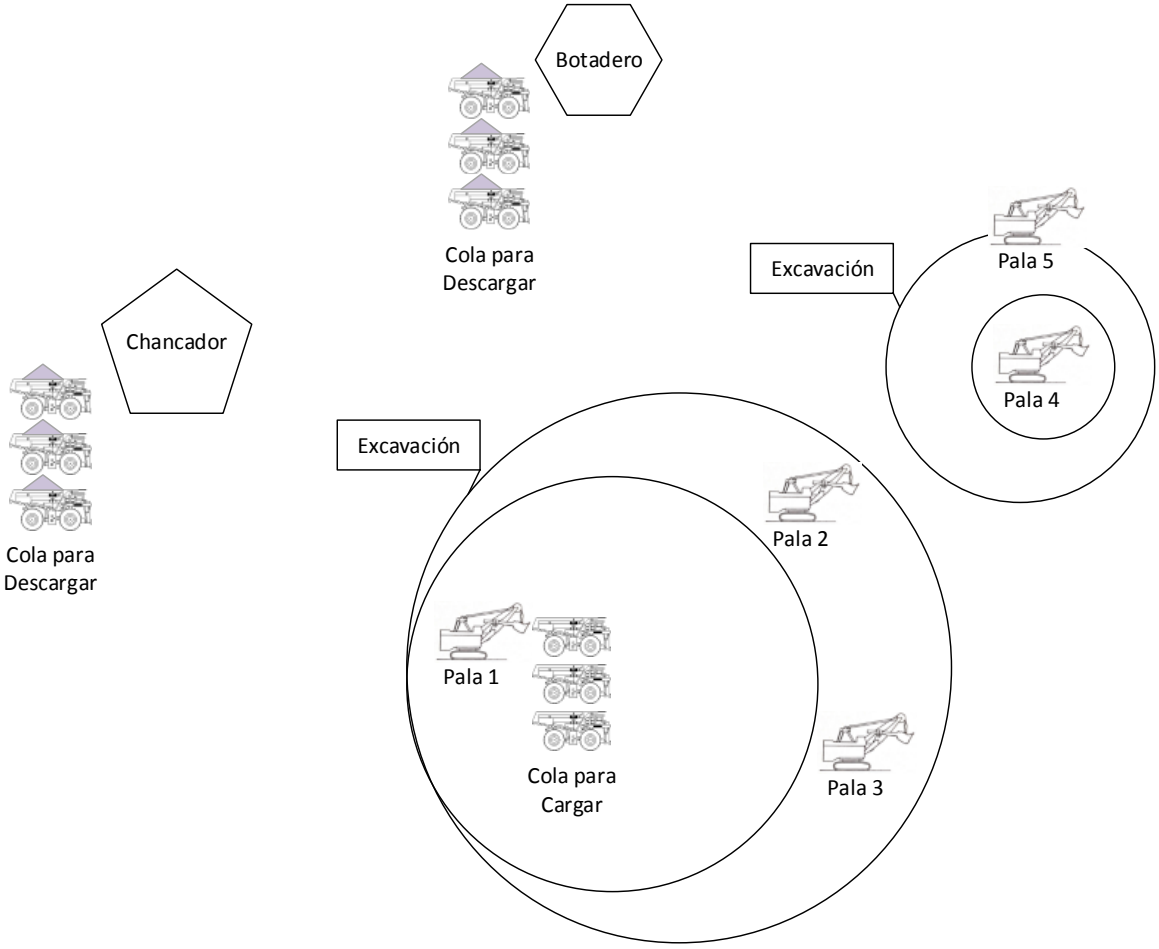


Figura 3-1. Esquema de la operación minera considerada en el modelo de simulación.

El flujo de camiones que existe en la operación minera se muestra en la Figura 3-2, donde las palas 1, 2 y 4 envían camiones al chancador, y las palas 3 y 5 al botadero. Desde los puntos de vaciado los camiones pueden ser destinados a cualquier pala, según lo que indique la estrategia de despacho utilizada.

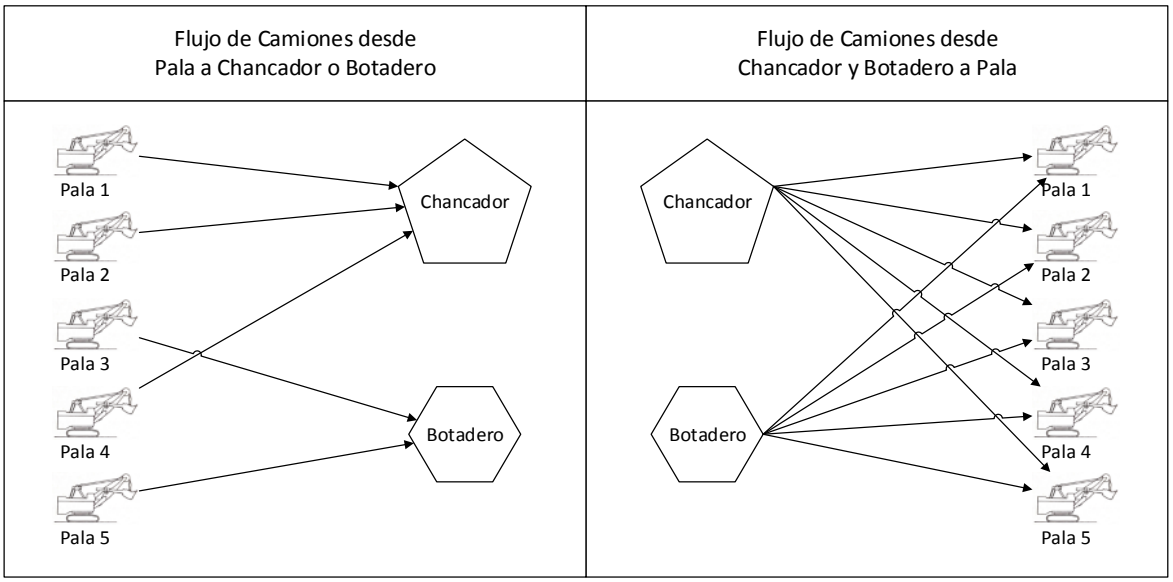


Figura 3-2. Flujo de camiones de la operación minera.

Es importante mencionar que el *layout* de la mina utilizado corresponde a una versión modificada de una operación minera real en Chile según un plano diario de operación del año 2009.

3.1.1 Parámetros del modelo de simulación

Las distancias entre palas y puntos de vaciado consideradas en el modelo de simulación se presentan en la Tabla 3-1, con esto y la fracción de la ruta en que los camiones viajan contra pendiente, caso que se da sólo en viajes que inician desde las palas, se calcula el tiempo de viaje entre los distintos sitios de la mina. La fracción de las rutas en que los camiones ascienden se muestra en la Tabla 3-2. La velocidad considerada para los camiones cuando transitan en rutas sin pendiente o bajando es de 40 km/h y de 20 km/h cuando existen pendiente en contra.

Tabla 3-1. Distancias entre los sitios de carga y descarga en el modelo de simulación.

Distancia (m)	Pala 1	Pala 2	Pala 3	Pala 4	Pala 5
Chancador	4.727	4.727	2.545	3.636	1.636
Botadero	4.090	3.726	3.726	4.000	2.000

Tabla 3-2 .Fracción de la ruta desde pala a sitio de vaciado en que los camiones suben

Fracción de la ruta con inclinación	Pala 1	Pala 2	Pala 3	Pala 4	Pala 5
Chancador	29%	23%	-	55%	-
Botadero	33%	29%	-	50%	-

La simulación considera los procesos de carga, transporte y descarga de los camiones, donde la duración de los procesos de carga y descarga se representan por medio de una distribución de probabilidades triangular con parámetros según se muestran en la Tabla 3-3.

Adicionalmente, para el caso de las palas, al tiempo de carga se le deben sumar 120 segundos en caso en que el camión a cargar entre directamente al sitio de carga sin pasar por la fila de la pala, se hace esta consideración debido al tiempo de aculatado de los camiones en el sitio de carga, que de estar en la fila el aculatado se realiza durante la carga del camión anterior.

Tabla 3-3. Parámetros de la distribución probabilística para los tiempos de carga y descarga de camiones.

Tiempo (segundos)	Mínimo	Moda	Máximo
Carga Pala	84	111	132
Descarga Chancador	60	90	100
Descarga Botadero	120	180	200

3.1.2 Horizonte de simulación y eventos del sistema

El horizonte de simulación del modelo es de 1 turno de operación, con una duración de 12 horas, en el que no se consideran interrupciones de ningún tipo. Esto, se debe a que el objetivo de la investigación es determinar las diferencias en productividad de los equipos mineros y desviación en relación al plan de producción diario debido al uso de diferentes estrategias para el despacho de camiones.

En la Figura 3-3 se presenta de manera esquemática el funcionamiento del modelo de simulación, indicando los procesos, eventos y puntos de decisión que caracterizan el sistema de acarreo, y la secuencia lógica que siguen El modelo considera 3 tipos de eventos: fin de viaje, fin de carga y fin de descarga.

Fin de viaje corresponde al instante en que un camión arriba a un sitio de carga o descarga, donde este podrá ingresar, en el caso de las palas siempre que esta no se encuentre cargando a algún otro camión; y en el caso del botadero o chancador cuando no haya ningún otro camión descargando material, en otro caso el camión deberá esperar su turno en una cola de tipo FIFO.

El fin de carga es el evento en que un camión acaba de ser cargado y debe dirigirse a un punto de vaciado, que puede ser chancador o botadero según corresponda. Si al

término de la carga hay camiones esperando su turno en cola, entonces el primero de la cola inicia su carga.

El evento fin de descarga corresponde al instante en que un camión acaba de descargar en chancador o botadero, y debe ser despachado hacia una pala para volver a cargar. Al igual que para el caso anterior, si se encuentran camiones en cola al momento de terminar una descarga, el primero de la cola inicia su descarga. Es en este evento cuando se debe tomar la decisión de destino para el camión, marcando los puntos de decisión en el sistema.

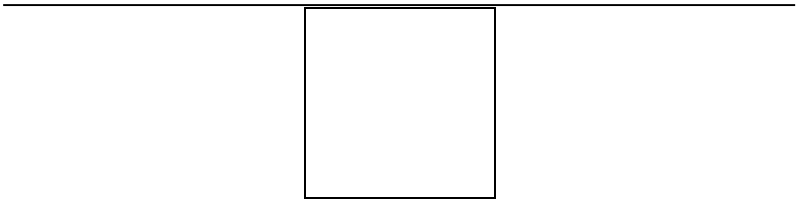


Figura 3-3. Esquema de eventos del modelo de simulación.

3.1.3 Medidas de desempeño de la simulación

Las medidas de desempeño a estudiar se eligen en función de las variables que se pretende optimizar al utilizar diferentes estrategias para el despacho de los camiones. De esta forma, el modelo de simulación entrega información suficiente para hacer un análisis de la productividad de la operación y la desviación de los resultados operacionales en comparación con los planes de producción La información que entrega el modelo es la siguiente:

a) Cantidad de camiones que fueron cargados en cada una de las palas.

b) Cantidad de camiones que descargaron en cada uno de los sitios de vaciado.

c) Tonelaje total de mineral transportado.

d) Tonelaje total de estéril transportado.

e) Ley de mineral promedio recibida en el chancador cada 30 minutos de operación.

f) Razón estéril-mineral promedio del total del material transportado cada 30 minutos de operación.

g) Alimentación a chancador total medida en toneladas cada 30 minutos de operación

3.1.4 Escenarios evaluados en el estudio

El objetivo de esta sección es presentar los escenarios a evaluar durante el estudio de simulación.

Para las pruebas realizadas se consideró un escenario base y 3 escenarios alternativos, con variaciones en la cantidad de camiones del sistema, leyes de mineral disponibles en las palas, ley objetivo del chancador, razón estéril-mineral objetivo y alimentación objetivo al chancador. El detalle de los escenarios considerados se muestra en la Tabla 3-4:

Tabla 3-4. Descripción de los escenarios a evaluar en la simulación.

	Escenario base	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
N° de camiones	30	25	35	30
Leyes de mineral disponibles	Pala 1: 0,73% Pala 2: 0,87% Pala 4: 0,95%	Pala 1: 0,73% Pala 2: 0,87% Pala 4: 0,95%	Pala 1: 0,73% Pala 2: 0,87% Pala 4: 0,95%	Pala 1: 0,73% Pala 2: 0,95% Pala 4: 0,95%
Ley objetivo en chancador	0,85%	0,85%	0,85%	0,85%
Razón Estéril/Mineral	0,4	0,4	0,4	0,4
Alimentación Chancado (Ton/hr)	16.000	16.000	16.000	13.850

Es importante mencionar que el número de camiones del escenario base corresponde al óptimo determinado según el modelo de asignación de flujos propuesto por Ta et al. (2010), que se detalla en la siguiente sección. Asimismo, la alimentación a chancado objetivo se determina según el mismo modelo buscando la existencia de soluciones factibles para la asignación de flujos.

Los escenarios alternativos consideran casos con una dotación de camiones subestimada (escenario 1), que entorpece el cumplimiento de la tasa de alimentación a chancado cuando se busca cumplir con restricciones de ley objetivo a planta y mantener una razón estéril-mineral determinada; sobrestimada (escenario 2), que facilita el cumplimiento de la tasa de alimentación del chancador, pero genera

congestión en los puntos de carga y vaciado; además de un caso con una disponibilidad de leyes diferente en las palas, que dificulta la obtención de la alimentación exigida por el chancador (escenario3).

3.1.5 Modelo de asignación de flujos de material

El modelo de asignación de flujos, o *Upper Stage* del sistema de gestión de flota según lo definen Alarie y Gamache (2002), se encarga de distribuir la extracción de material en cada pala para lograr mayor eficiencia en los procesos de concentración y tratamiento de mineral. El modelo asegura satisfacer las restricciones operacionales impuestas por la planta de tratamiento, que exige una alimentación constante y superior a una cota mínima, además de un intervalo de leyes de mineral que permite homogenizar las especificaciones de los procesos químicos asociados a la concentración de mineral.

Para estimar el flujo de mineral que debe moverse desde cada una de las palas a la planta de tratamiento durante un turno en la simulación, se utiliza el modelo propuesto por Ta et al. (2010), que tiene como objetivo mantener estable el *throughput* de mineral a la planta cumpliendo con el intervalo de leyes de mineral exigido al más bajo costo posible. Otros modelos de asignación de camiones son propuestos por Soumis et al. (1989), Li (1990), White y Olson (1992), Xi y Yegulalp (1994), Temeng et al. (1998), Burt et al. (2005) y Ta et al. (2005), pero los únicos que incorporan la congestión dentro de la red de transporte de material son los modelos propuestos por Soumis et al (1989), que considera el tiempo de espera de los camiones como parte de la función objetivo, y el de Ta et al. (2010), que se describe a continuación.

El modelo básico propuesto por Ta et al. (2010) se formula para encontrar el tamaño mínimo de una flota de camiones que debe ser asignado a un conjunto de palas, cumpliendo con el *throughput* mínimo requerido por la planta R y los límites inferior y superior de leyes de mineral admitidos por ésta, G^l y G^u, respectivamente. Para estimar los flujos de mineral generados por cada pala se ajusta el sistema con una

aproximación de un modelo de colas G/G/1, que considera una tasa de atención μ medido en camiones/hora y tiempo entre llegadas de camiones caracterizado por la duración del ciclo de los camiones y tasa de llegada λ, también medido en camiones/hora. Con esta información, se calcula el *throughput* T de cada pala en el largo plazo, para una determinada capacidad de carga de camión L medida en toneladas, cierto número y de camiones asignados a la pala, y la probabilidad $\pi_0(y)$ de encontrar una pala ociosa en un instante cualquiera, según las siguientes expresiones:

$$T = \mu[1 - \pi_0(y)]L \tag{3-1}$$

$$\pi_0^{G/M/1}(y) = \frac{r^{-y}/y!}{\sum_{i=0}^{y} r^{-i}/i!} \tag{3-2}$$

$$\pi_0^{D/D/1}(y) = \begin{cases} 1 - \dfrac{y}{1 + \dfrac{1}{r}}, & y \leq 1 + \dfrac{1}{r} \\ 0 \qquad\quad , & y > 1 + \dfrac{1}{r} \end{cases} \tag{3-3}$$

$$\pi_0^{G/G/1}(y) = \left[\frac{1 + c_s^2}{2}\right]\pi_0^{G/M/1}(y) + \left[1 - \frac{1 + c_s^2}{2}\right]\pi_0^{D/D/1}(y) \tag{3-4}$$

La Figura 3-4 muestra la función de probabilidad obtenida para encontrar una pala ociosa con diferente número de camiones asignados, considerando un tiempo medio de atención de 3 minutos y tiempo medio entre llegada de camiones de 9 minutos.

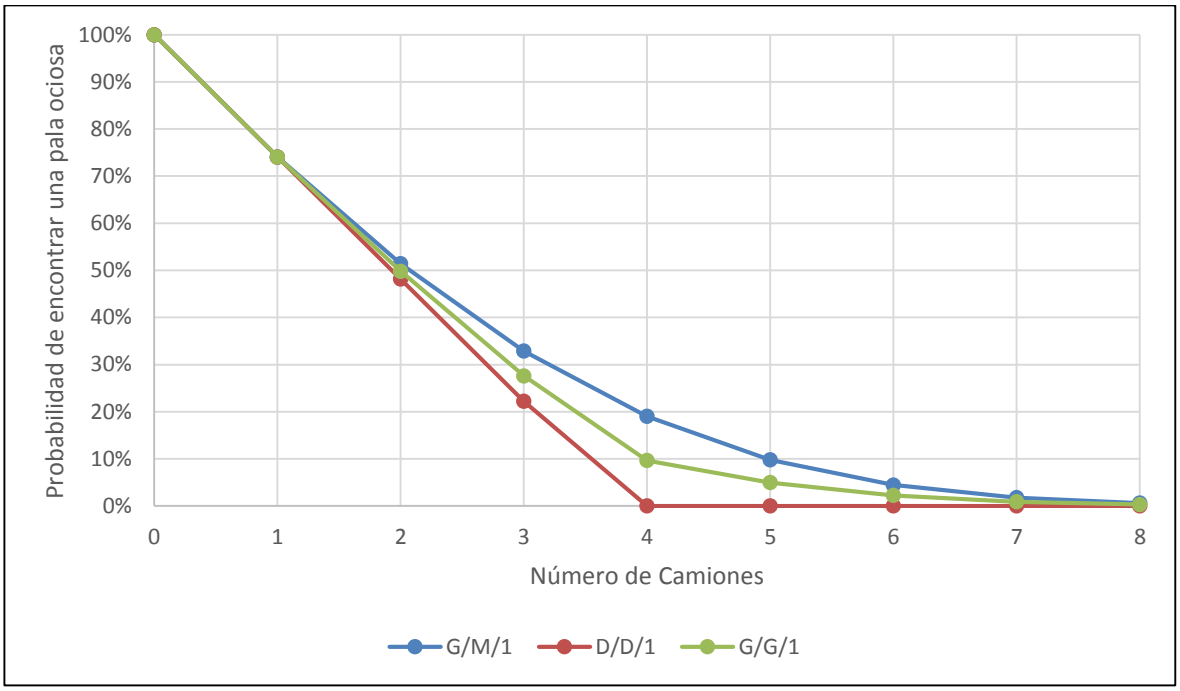


Figura 3-4. Función de probabilidad de encontrar una pala ociosa en el sistema.

La función de probabilidades de encontrar una pala ociosa se indexa según el número de camiones asignados a cada pala en un vector w_i, con i dado por un conjunto de camiones $I = \{1, \dots, m\}$, y una variable binaria x_i que indica la condición de número y de camiones en que se encuentra una determinada pala. De esta forma, la probabilidad de encontrar una pala ociosa con y camiones asignados en el largo plazo del sistema se define como muestran las ecuaciones siguientes:

$$\pi_0(y) = \sum_{i \in I} w_i x_i \tag{3-5}$$

$$\sum_{i \in I} x_i = 1 \tag{3-6}$$

$$y = \sum_{i \in I} i x_i \tag{3-7}$$

Con esto, dado un conjunto de palas $J = \{1, \dots, n\}$, se define el siguiente modelo de optimización:

$$Min \quad \sum_{j \in J} y_j$$

S.a.

$$\sum_{j \in J} T_j \geq R \tag{3-8}$$

$$\sum_{j \in J} g_j T_J \leq G^u \sum_{j \in J} T_j \tag{3-9}$$

$$\sum_{j \in J} g_j T_J \geq G^l \sum_{j \in J} T_j \tag{3-10}$$

$$T_j = \mu_j \left(1 - \sum_{i \in I} w_{ij} x_{ij}\right) L \tag{3-11}$$

$$y_j = \sum_{i \in I} i x_{ij} \quad \forall j \in J \tag{3-12}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \tag{3-13}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \qquad \forall j \in J \tag{3-14}$$

$$T_j \geq 0, \quad y_j \geq 0 \quad \forall j \in J \tag{3-15}$$

El modelo minimiza el total de camiones requeridos en cada pala para cumplir con las restricciones de alimentación a planta de tratamiento, restricción (3-8), y el rango de leyes admitido por ésta, restricciones (3-9) y (3-10). La restricción (3-11) indica la relación entre los flujos de mineral de cada pala y su tasa de atención. Las

restricciones (3-12) y (3-13) relacionan la variable binaria x_{ij} con la cantidad de camiones asignados a cada pala.

3.1.6 Resultados del modelo de asignación de flujos de material

Para obtener resultados del modelo que consideren la razón estéril-mineral dentro de la optimización, se incluyó al modelo las restricciones (3-1) y (3-2), que se presentan a continuación:

$$\sum_{j \in J} T_j^{Estéril} \leq EM^u \sum_{j \in J} T_j^{Mineral} \tag{3-1}$$

$$\sum_{j \in J} T_j^{Estéril} \geq EM^l \sum_{j \in J} T_j^{Mineral} \tag{3-2}$$

donde EM^u y EM^l representan una cota superior e inferior para la razón estéril-mineral, respectivamente.

Con el modelo de optimización, programado y resuelto con el complemento Solver de Microsoft Excel®, se obtuvo la cantidad de camiones a asignar a cada pala, para el caso de utilizar camiones en circuito fijo, y el flujo de material objetivo para cumplir con la ley de mineral exigida por la planta de tratamiento, la razón estéril-mineral y la alimentación del chancador. Los valores entregados por el modelo para cada escenario se muestran en la Tabla 3-5, donde los escenarios 1 y 2 consideran sólo el resultado para los flujos de material, ya que la asignación de camiones no corresponde a la cantidad de camiones del sistema.

Tabla 3-5. Resultados del modelo de asignación de flujos de material para los distintos escenarios.

	Escenario base, 1 y 2	Escenario 3
Camiones asignados a cada pala	Pala 1: 9 Pala 2: 7 Pala 3: 2 Pala 4: 7 Pala 5: 5	Pala 1: 13 Pala 2: 3 Pala 3: 1 Pala 4: 8 Pala 5: 5
Flujo de material (Ton/hr)	Pala 1: 5.450 Pala 2: 4.979 Pala 3: 1.724 Pala 4: 5.678 Pala 5: 4.639	Pala 1: 5.698 Pala 2: 2.296 Pala 3: 877 Pala 4: 5.883 Pala 5: 4.639

4 METODOLOGÍAS DE DESPACHO PROPUESTAS

En esta tesis se presentan tres metodologías basadas en técnicas de simulación on-line para resolver el problema de despacho de camiones en operaciones mineras a cielo abierto. Las metodologías propuestas consisten en la utilización de un modelo de simulación, que representa un sistema de acarreo, para evaluar el impacto de cada decisión de despacho de camiones en medidas de desempeño globales del sistema, como la ley media a chancado y la razón estéril-mineral.

Debido a que la distribución de la mineralización dentro de un yacimiento no es uniforme, en una mina existen zonas con diferentes leyes de mineral, lo que resulta en palas que excavan roca con distintas concentraciones de la especie valiosa o sin presencia de ésta dependiendo del sector de la mina en que se encuentren operando. Ésta diferencia entre las leyes de mineral que se extraen desde distintos puntos de la mina produce variaciones en la ley media del mineral que llega a la planta concentradora, generando ineficiencias operacionales en el proceso de concentrado, que se traducen en una disminución de la recuperación[2] de mineral.

Otra variable importante a considerar es la razón estéril-mineral, que se debe mantener de acuerdo un plan de extracción. Dentro de un turno de operación, típicamente de entre 8 a 12 horas, mantener controlada la razón estéril-mineral del material excavado permite estabilizar la alimentación de mineral a chancado, ajustando los niveles de producción al plan minero. Al superar la razón estéril-mineral planificada, más camiones de lo flota estarán dedicados al acarreo de estéril y menos al transporte de mineral, lo que impacta en una disminución de la tasa de producción de mineral, aumentando el tiempo ocioso del chancador e impidiendo el cumplimiento de metas productivas. En caso contrario, al operar con una razón estéril-mineral más baja, la producción de mineral aumenta, superando la tasa de alimentación a chancado. Esto genera la necesidad de acopiar el

[2] Se entiende por recuperación como la proporción de la especie valiosa que será posible extraer luego de un proceso de concentración de mineral.

mineral para ser enviado a chancador en períodos con menor producción de mineral, adicionando costos por remanejo al proceso productivo.

En la Figura 3-1 se presenta de manera esquemática el funcionamiento general de las metodologías propuestas. El modelo de simulación recibe como información de input el *layout* de la operación minera, incluyendo detalles de las palas, chancadores y botaderos, además de las distancias entre los distintos puntos y la velocidad de los camiones en ruta. Adicionalmente, se le entrega información acerca de las leyes de mineral exigidas por la planta y la razón estéril-mineral que se debe manejar durante el turno para lograr el desarrollo de la mina según lo planificado. Con esta información y datos actualizados del desempeño y posicionamiento de los equipos en el sistema, es posible tomar una decisión de despacho a través del modelo de simulación.

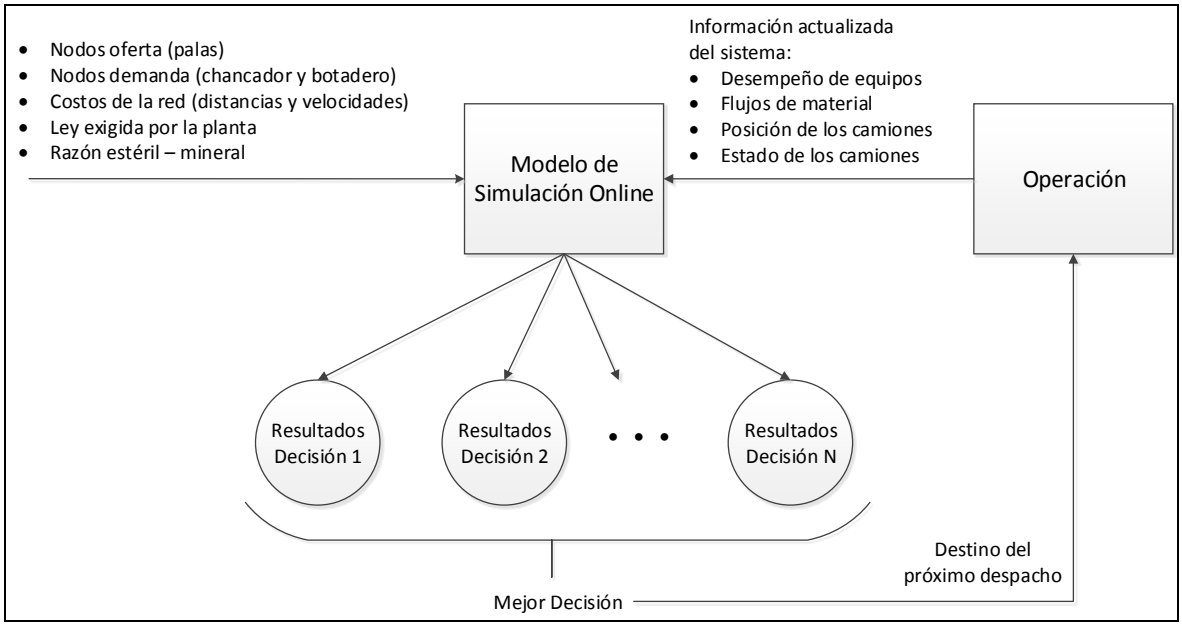


Figura 4-1. Esquema general del funcionamiento de la metodología de despacho propuesta.

Las metodologías diseñadas para tomar la decisión de despacho utilizando el modelo de simulación, y que serán descritas en detalle en la sección 4.2, se basan en la comparación de los resultados obtenidos luego de la evaluación de diferentes alternativas de despacho. Esta comparación se lleva a cabo por medio de una función objetivo que minimiza la desviación de la razón estéril-mineral y la ley de mineral que se envía a la planta concentradora respecto a ciertos objetivos prestablecidos, para luego tomar la mejor decisión de despacho y asignarla al camión.

4.1 Simulación on-line para el despacho de camiones mineros

El modelo de simulación utilizado representa un sistema de acarreo de material a través de los procesos de carga, viaje y descarga de los camiones, según lo expuesto en la Figura 1-3 de la página 5.

Decidir el destino de despacho de un camión involucra la simulación de diferentes alternativas de asignación, tanto para el camión que solicita despacho, como para los demás camiones que deben ser despachados dentro del horizonte de simulación. Esto genera la necesidad de evaluar el desempeño operacional para un gran número opciones, dadas por las posibles combinaciones de despacho, antes de decidir el mejor destino para el camión solicitante. Con esto, se elimina el carácter "miope" de tomar una decisión sin considerar el impacto de ésta en las próximas decisiones de despacho, ya que a través del modelo de simulación es posible predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes combinaciones de despacho.

La Figura 4-2 muestra de manera esquemática las combinaciones posibles que resultan al evaluar el despacho de un camión. El primer círculo a la izquierda de la figura representa la primera decisión de despacho a realizar (camión solicitante), que tiene un número de alternativas posibles igual a la cantidad de palas a las que puede destinarse el camión. Las palas de destino se representan como flechas hacia la próxima decisión de despacho. En el ejemplo, dado un destino para el camión solicitante (Camión 1) existen 5 alternativas de despacho para el Camión 2, lo mismo para el Camión 3, y así sucesivamente hasta la asignación del Camión n, con lo que

la cantidad de combinaciones posibles en una decisión de despacho crece de manera exponencial al aumentar el número de camiones a ser despachados en el horizonte de simulación. La cantidad de palas en operación (alternativas de despacho) se relaciona con el número de camiones a despachar según la ecuación (4-1), donde Z representa el universo de combinaciones posibles.

$$Z = N°palas^{N°despachos} \quad (4\text{-}1)$$

La necesidad de tomar una decisión en tiempo real cada vez que un camión solicite ser despachado requiere que el tiempo de cómputo del modelo de simulación sea lo más acotado posible. Sin embargo, el gran número de combinaciones posibles que se deben evaluar para tomar una decisión de despacho y la consecuencia de éste en los próximos, vuelve imprescindible la incorporación de técnicas que permitan recorrer de manera eficiente el universo de combinaciones posibles.

De esta forma, es necesario simular un horizonte de tiempo que permita incorporar un mayor número de decisiones de despacho, y de esta manera predecir, por medio del modelo de simulación, el comportamiento global del sistema luego de asignado el destino del camión solicitante, sin evaluar la totalidad de las combinaciones.

En este trabajo se proponen 3 métodos para la selección de las combinaciones a evaluar. La primera, evalúa sólo una fracción de las combinaciones posibles, dado por las distintas alternativas de destino para el camión solicitante y la generación aleatoria de destinos para el despacho de los demás camiones, generando un indicador estadístico del desempeño del sistema al seleccionar distintos destinos para el camión solicitante. La segunda, se enfoca en simular sólo aquellas combinaciones que se espera presenten un buen desempeño, las que se consiguen mediante la incorporación de algunas de las estrategias descritas en el Capítulo 2 para la toma de decisiones de despacho dentro de la simulación. Y la última corresponde a una combinación de los dos primeros.

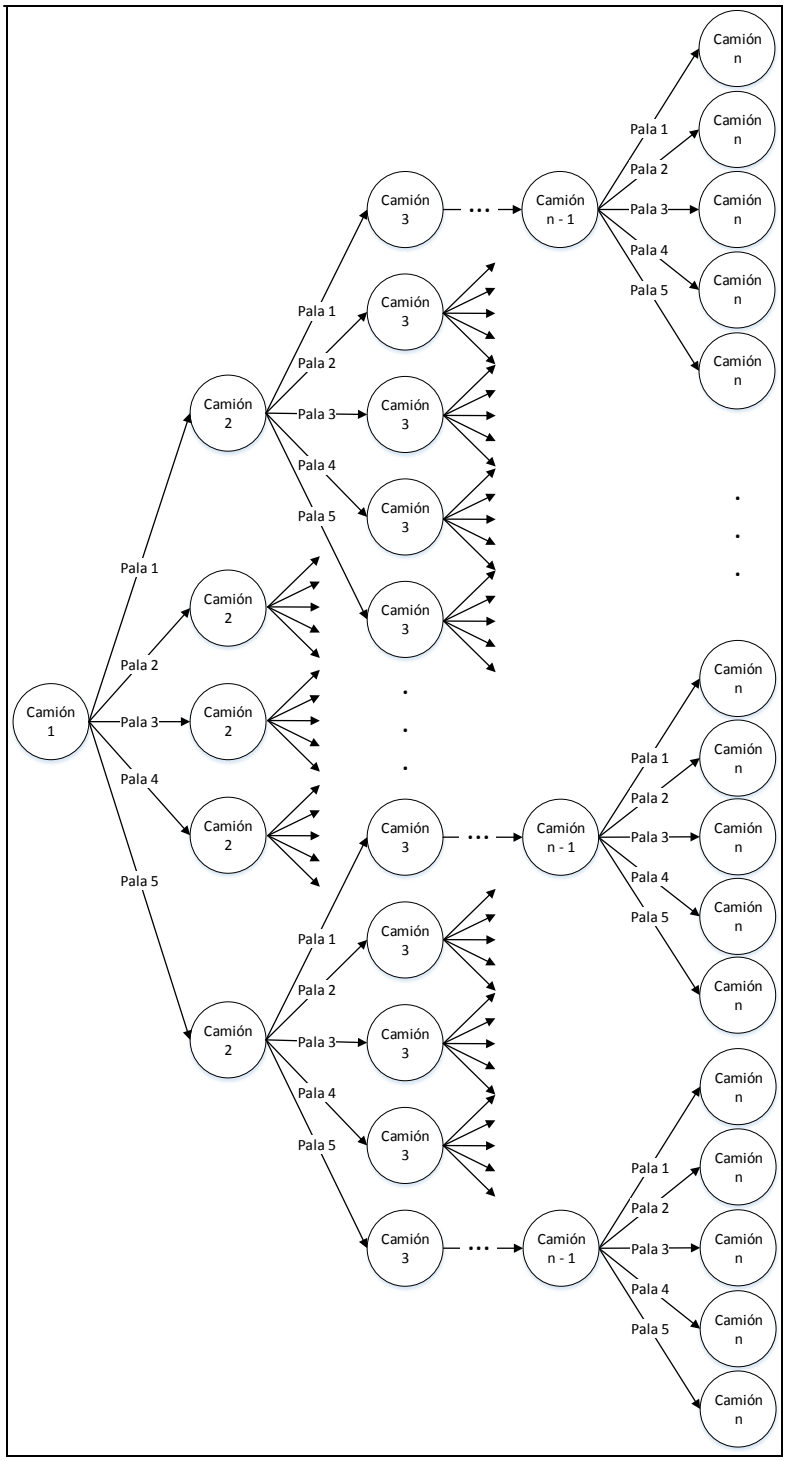


Figura 4-2. Esquema de las combinaciones posibles a evaluar en el modelo de simulación on-line.

4.2 Modelo de simulación on-line

El modelo de simulación on-line se basa en la ocurrencia de 3 eventos dentro de la operación de la mina, estos son: fin de una carga, fin de un viaje y fin de una descarga de camión, donde cada uno de los eventos marca el inicio de un nuevo proceso, siendo éstos: inicio de un viaje a chancador o botadero, inicio de una carga o entrada en la cola para cargar e inicio de un viaje a pala, respectivamente.

En la Figura 4-3 se representan los eventos y procesos que componen el modelo de simulación. Con el número 1 se indica el fin de la carga de un camión con mineral o material estéril, que marca el inicio de su viaje hacia el sitio de vaciado, que puede ser chancador o botadero, respectivamente. El número 2 corresponde al fin de un viaje, si no se encuentran camiones en cola en el sitio de vaciado, el camión inicia inmediatamente la descarga, en otro caso, ingresa a la cola y espera su turno. Por último, el número 3 indica el fin de descarga de un camión, que marca el inicio del viaje hacia una pala para ser cargado nuevamente. En este último evento el modelo toma una decisión de despacho, indicando al camión la pala de destino más conveniente. Esta elección despenderá de la estrategia de despacho utilizada según las diferentes metodologías evaluadas en este trabajo.

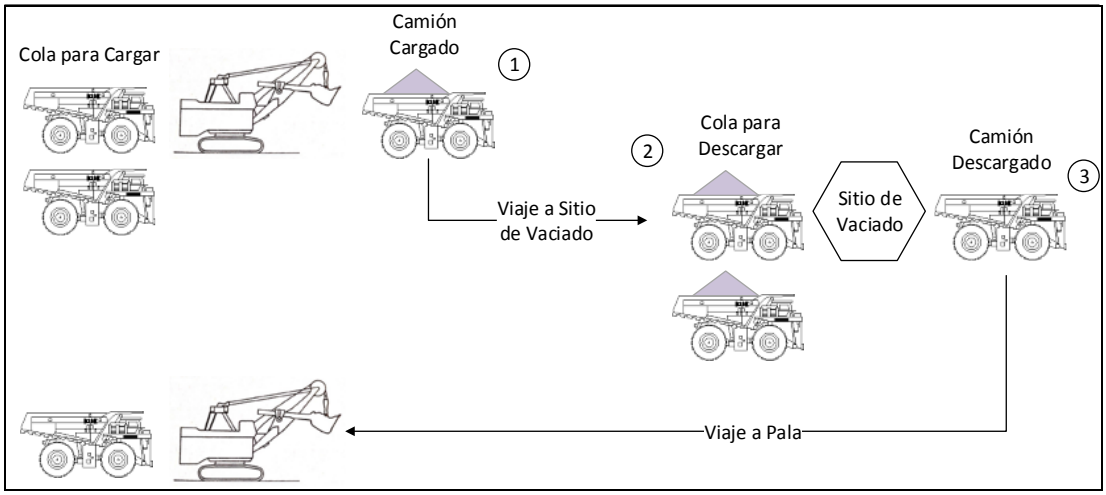


Figura 4-3. Eventos del modelo de simulación on-line.

4.3 Métodos de despacho estudiados

A continuación se presentan las 3 metodologías de despacho estudiadas: Generación Aleatoria de Soluciones (GAS), la técnica SRDM propuesta por Dalal et al. (2003) y SRDM Mixto. Estas metodologías se diferencias entre sí según se muestra en la Tabla 4-1:

Tabla 4-1. Comparación métodos de despacho estudiados.

Metodología	Horizonte de simulación	Número de alternativas a evaluar	Método de despacho para camiones distintos al solicitante
GAS	Variable, igual al tiempo que toma hasta que el camión que solicita despacho se encuentre cargado	Igual al número de palas en el sistema	Aleatorio
SRDM	Fijo, definido por el usuario en base a experimentación	Igual al número de métodos de despacho considerados	White y Olson (1992) Li (1990)
SRDM Mixto	Fijo, definido por el usuario en base a experimentación	Igual al número de métodos de despacho considerados	White y Olson (1992) Li (1990) GAS

Como se aprecia en la tabla anterior, la metodología GAS es la única que utiliza un horizonte de simulación variable, definido de esta manera para que la decisión de despacho no considere el desempeño del sistema incluyendo futuras decisiones de despacho para el camión solicitante. Adicionalmente, este método considera un número de alternativas de despacho para cada decisión igual al número de palas operativas, ya que evalúa el desempeño del sistema en caso de asignar el camión solicitante a cada una de las palas del sistema. A diferencia de la metodología GAS, las técnicas SRDM y SRDM Mixto consideran un horizonte de simulación fijo

definido por el usuario, ya que para tomar la decisión de despacho se basan en la comparación de utilizar diferentes métodos de despacho para la toma de decisiones futuras en el sistema, sin estimar cuál es la mejor asignación para el camión solicitante, sino que buscando la mejor metodología de despacho para estimarla entre un conjunto de opciones.

4.3.1 Generación aleatoria de soluciones (GAS)

Esta metodología selecciona el destino de despacho del camión solicitante según la alternativa que presente el mejor desempeño del sistema. Para determinar el desempeño de cada alternativa se evalúan una a una las opciones de despacho disponibles según cierta función objetivo, que busca minimizar la desviación con respecto a los objetivos de leyes de mineral a planta concentradora y razón estéril-mineral. Las diferentes alternativas son evaluadas utilizando el modelo de simulación on-line.

A modo de ejemplo, como se muestra en la Figura 4-4, el camión solicitante (Camión 1) tiene 5 alternativas de despacho, el primer paso es definir el desempeño del sistema al destinar el camión a la pala 1, lo que se logra despachando de manera aleatoria los siguientes camiones dentro del horizonte de simulación. Para obtener un indicador estadístico representativo del desempeño del sistema es necesario realizar múltiples réplicas de la simulación. Posteriormente, se estima el desempeño del sistema al seleccionar las siguientes palas desde la 2 a la 5. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos para cada alternativa de despacho y se selecciona la que presenta el mejor desempeño del sistema.

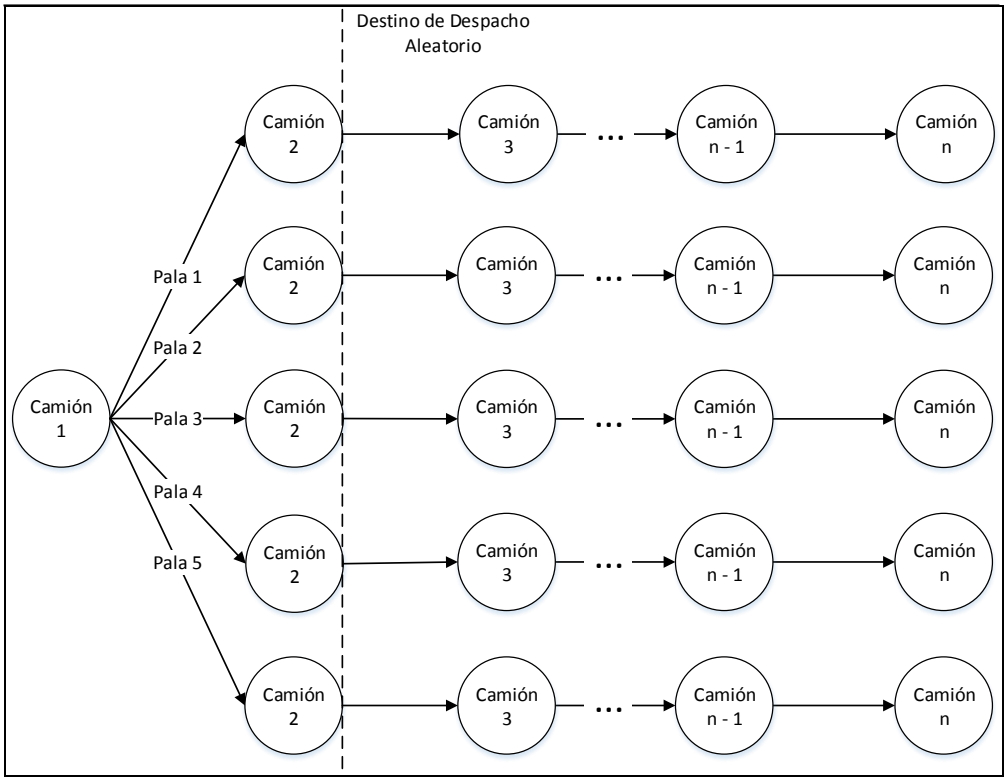


Figura 4-4. Esquema de las decisiones de despacho del método GAS.

Este método considera un horizonte de simulación variable igual al tiempo que toma hasta que el camión que solicita despacho haya terminado de cargar en la pala de destino seleccionada. Esto, bajo el supuesto de que el destino del presente despacho afecta en mayor medida a los despachos a realizarse en el tiempo más próximo a éste y teniendo poca incidencia en los despachos más alejados temporalmente. Adicionalmente, el horizonte de simulación variable permite evaluar el desempeño del sistema en un espacio temporal que considera sólo el impacto de la presente decisión de despacho para un mismo camión y no una secuencia de decisiones futuras.

Una ventaja de utilizar este método para la toma de decisiones de despacho, es que a diferencia de las metodologías presentadas en las secciones 2.1.2 y 2.1.3 del Capítulo 2, esta no requiere de la resolución del problema en varias etapas

secuenciales, resolviendo el problema de asignación de flujos de material y el problema de despacho de camiones en tiempo real y en una sola etapa.

La Figura 4-5 presenta un diagrama de flujo que detalla el modelo de simulación utilizado en esta metodología.

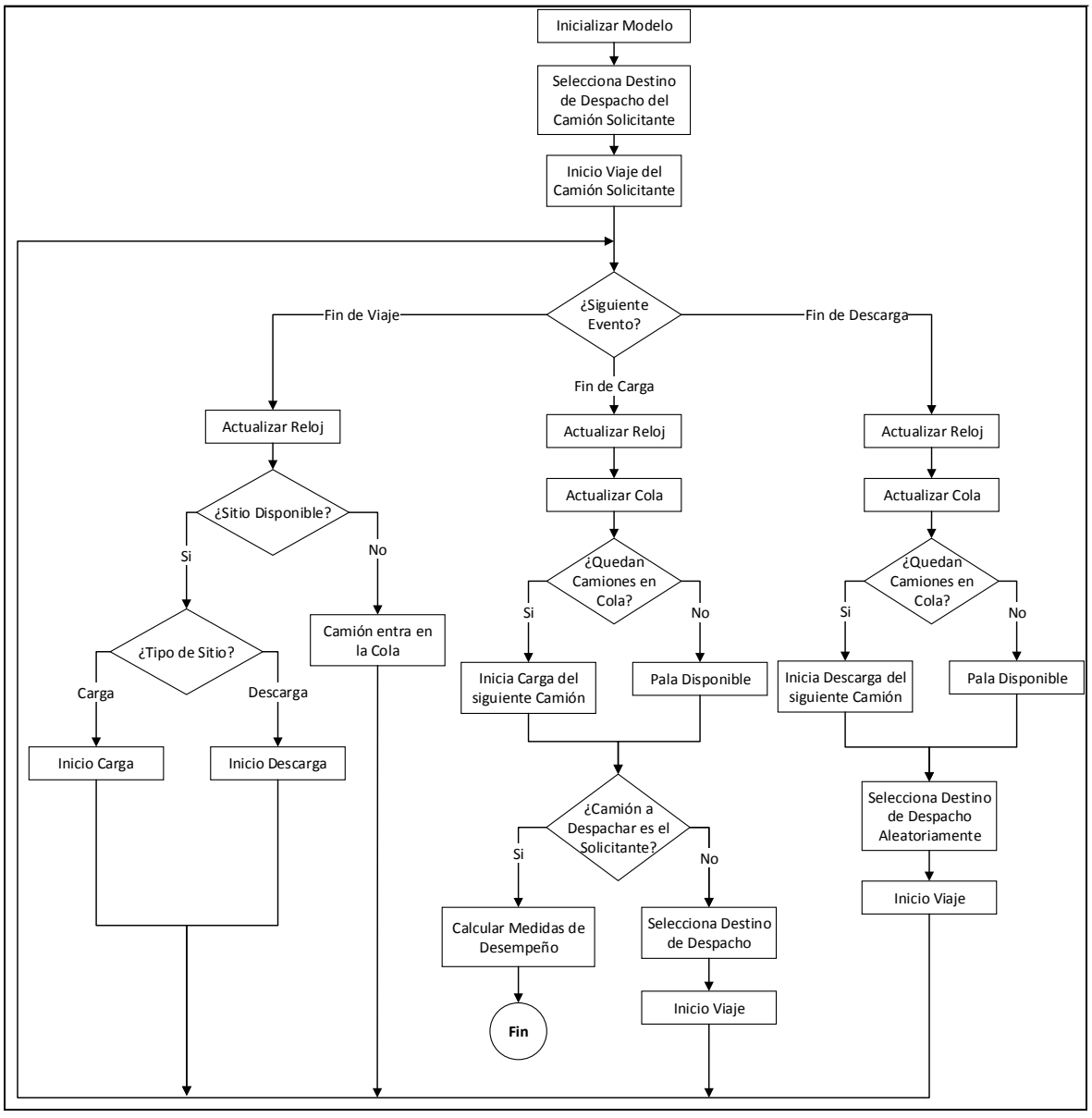


Figura 4-5. Diagrama de flujo del modelo de simulación on-line, método GAS.

A partir de los resultados de seleccionar cada una de las palas para el camión solicitante entregados por la simulación en tiempo real, se estima un estadístico según una función que considera los costos de alejarse de los objetivos de ley media de mineral a chancado y razón estéril-mineral, según la ecuación (4-2):

$$F.O. = a\left(Ley_{Objetivo} - Ley_{Simulación}\right)^2 + b\left(Rem_{Objetivo} - Rem_{Simulación}\right)^2 \quad (4\text{-}2)$$

donde a y b representan parámetros de peso de la función objetivo, y cada costo asociado a la desviación se calcula como el cuadrado de la diferencia entre el valor objetivo y el valor medio obtenido al correr cierto número de réplicas de la simulación considerando diferentes destinos para el despacho del camión solicitante.

Al minimizar la desviación de dos medidas de desempeño en una sola función objetivo, es necesario asignar los pesos de la función tomando en cuenta que existe un *trade-off* entre una menor desviación de la ley a chancado por una mayor desviación de la razón estéril-mineral. De esta forma, resulta necesario estimar una distribución de pesos conveniente en términos operativos para calibrar la función objetivo. La calibración del modelo se detalla en la sección 4.4.1.

4.3.2 Técnica SRDM

La técnica SRDM (*Simulated-based Real-Time Decision Making*), presentada por Dalal et al. (2003), corresponde a un proceso dinámico de toma de decisiones útil para sistemas que continuamente requieren de la toma de decisiones en tiempo real para optimizar algunas medidas de desempeño globales del sistema. La Figura 4-6 muestra el esquema de funcionamiento de la técnica SRDM, que básicamente consiste en evaluar el uso de ciertas políticas para la toma de decisiones, dando una mirada a cómo se comportaría el sistema en el futuro con el uso de dicha política en momentos en que la operación del sistema lo requiera. De esta forma, la simulación de cada una de las decisiones permite eliminar el carácter "miope" de ciertas reglas de decisión o métodos heurísticos, entregando un resultado basado en medidas de

desempeño globales del sistema durante un cierto horizonte de tiempo con la utilización de cada política de decisión.

Suponiendo que existe un conjunto de métodos alternativos para tomar las decisiones de despacho de camiones en una operación minera, como los presentados en el Capítulo 2, la técnica SRDM consiste en simular la operación minera utilizando cada uno de éstos métodos de despacho para la toma de decisiones dentro del horizonte simulado. Con los resultados obtenidos de la simulación, se escoge la alternativa que presente los mejores resultados para ciertas medidas de desempeño del sistema, para tomar la decisión de despacho en el sistema real mediante el método que resulte más conveniente.

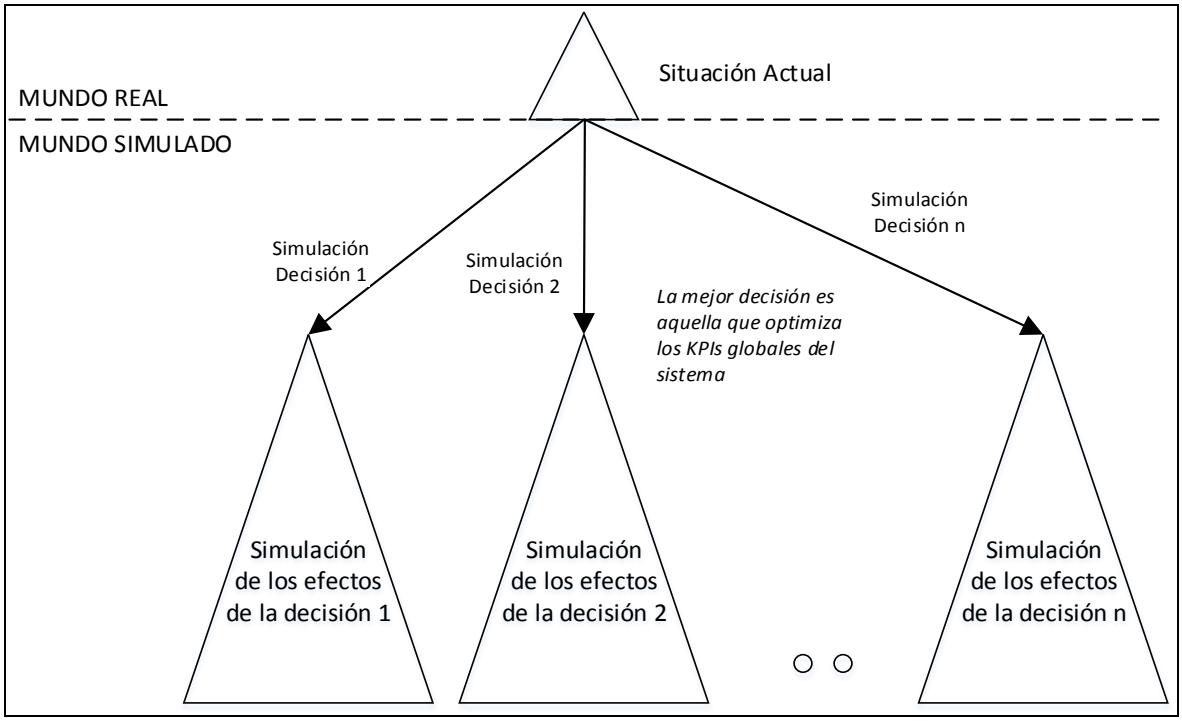


Figura 4-6. Toma de decisiones en tiempo real basada en simulación (SRDM) – fuente: Dalal et al. (2003).

Para aplicar esta técnica es necesario trabajar con los conceptos de profundidad y ancho. El primero se refiere al horizonte temporal a simular cuando se requiera tomar una decisión, teniendo que a mayor largo de éste mejor será la estimación de las medidas de desempeño del sistema, pero también aumentará el tiempo de cómputo de la solución. El segundo alude a la cantidad de réplicas de la simulación a ejecutar en cada decisión, obteniendo resultados más confiables a medida que se tiene un mayor ancho de la simulación, pero aumentado el tiempo de cómputo. Por otra parte, está demostrado que a partir de un determinado ancho y profundidad no se produce una mejora mayor en los resultados para el sistema.

La aplicación de esta técnica en el caso estudiado considera la evaluación de dos metodologías de despacho como alternativas para la toma de decisiones. La primera, corresponde al método presentado por White y Olson (1992), cuya implementación computacional considera como *input* dos vectores: uno para las palas, que contiene información del flujo óptimo a mover desde cada una, el material ya movido hasta el instante en que se solicitó el despacho y el tiempo desde la última asignación de camión a esa pala; y otro para los camiones disponibles, que contiene información del tiempo estimado en que cada camión solicitará ser asignado a una pala. Es importante mencionar, que a diferencia de cómo se presenta el método en la sección 2.1.2, en esta implementación cada pala se asocia a una única ruta, por lo que el algoritmo opera de la siguiente manera:

a) El vector de palas es ordenado según el *need-time* de cada una, que se calcula a partir del tiempo esperado en que la pala requerirá una asignación de camión, se estima según la ecuación (2-4):

$$need - time_j = L_j + \frac{(A_j - R_j)}{P_j} \tag{4-1}$$

i) $L_j =$ tiempo en que el último camión fue asignado a la pala j. Medido en horas (hr).

ii) $A_j =$ tonelaje total de material acarreado con origen en la pala j desde el inicio de la operación hasta el instante L_j. Medido en toneladas (ton).

iii) $R_j =$ requerimiento total de acarreo desde la pala j en el turno de operación. Medido en toneladas (ton).

iv) $P_j =$ flujo de material objetivo que debe ser acarreado desde la pala j. Medido en toneladas por hora (ton/hr).

b) Se selecciona la pala con el menor *need-time*.

c) Se busca el mejor camión para asignación, basado en la variable *lost-tons*, que se define según la ecuación (2-5):

$$lost - tons = TC\frac{TR}{RT}\ (TI + ET) + (SR \times SI) \tag{4-2}$$

donde:

i) $TC =$ ratio entre la capacidad del camión a ser asignado y la capacidad promedio de los camiones. Adimensional.

ii) $TR =$ tasa de excavación total de todas las palas en la mina. Medida en toneladas por hora (ton/hr).

iii) $RT =$ número total de camiones con que opera la simulación.

iv) $TI =$ tiempo ocioso esperado del camión si es asignado a la pala con el menor *need-time*. Medido en horas (hr).

v) $ET =$ tiempo extra de viaje del camión descargado que se deberá realizar al asignar el camión a la pala con el menor *need-time*, respecto a lo que significaría asignarlo a la pala más cercana. Medido en horas (hr).

vi) $SR =$ tasa de material que se debe acarrear desde la pala con el menor *need-time*. Medido en toneladas por hora (ton/hr).

vii)$SI =$ tiempo ocioso esperado de la pala con el menor *need-time* si se le asigna el camión para el que se está calculando el *lost-tons*. Medido en horas (hr).

Así, por medio de la ecuación (2-5) se estima la pérdida de eficiencia del sistema por la asignación de cada uno de los camiones a la pala que presenta el menor *need-time*.

d) Se asigna a la pala con el menor *need-time* el camión que minimice el *lost-tons*, y se selecciona la siguiente ruta del arreglo ordenado según *need-time* para realizar el mismo procedimiento. Se repite hasta que todos los camiones hayan sido asignados y se entrega al sistema la asignación del camión que la solicitó.

La segunda metodología utilizada es la presentada por Li (1990), que consiste en una estrategia de despacho llamada "máxima desviación del tiempo entre camiones". Para su funcionamiento, se define $t_{i,j}^{*}$ como el tiempo óptimo entre camiones en la ruta que une los sitios i con j, según la ecuación (4-3):

$$t_{i,j}^{*} = \frac{1}{X_{i,j}^{*}} \tag{4-3}$$

donde $X_{i,j}^{*}$ es el flujo óptimo de camiones en la ruta i, j, medido en camiones/hora. Además, se define $t_{i,j}$ como el intervalo de tiempo entre el momento en que un camión solicita su despacho y el tiempo del último despacho en la ruta i, j, con esto, la desviación del tiempo entre camiones, definida como $\Delta t_{i,j}$ se calcula según la ecuación (4-4):

$$\Delta t_{i,j} = t_{i,j} - t_{i,j}^{*} \tag{4-4}$$

Finalmente, se asigna un camión vacío situado en el sitio i al punto de carga j donde se encuentre la mayor desviación relativa del tiempo entre camiones $\delta_{i,j}$, que se calcula según la ecuación (4-5):

$$\delta_{i,j} = \Delta t_{i,j} / t_{i,j}^{*} \tag{4-5}$$

De esta forma, la técnica SRDM permite predecir cuál de los métodos entregará mejores resultados operativos a través de la simulación del sistema para la toma de todas las decisiones de despacho dentro del horizonte de simulación.

Utilizar la técnica SRDM comparando los métodos recién descritos, permite la toma de decisiones por medio de la metodología que resulte más conveniente en función del estado actual del sistema y de las consecuencias de la presente decisión en el futuro. Tener flexibilidad para la toma de decisiones de despacho según diferentes metodologías, permite evitar desequilibrios del sistema producidos por deficiencias en la precisión de los métodos para ciertos estados de la operación.

Para seleccionar la metodología de despacho que resulta más conveniente en cada decisión, se usa la misma función objetivo que en el método GAS, que se muestra en la ecuación (4-2). En este caso también es necesario estimar el valor de los parámetros a y b al utilizar la técnica SRDM, además de estudiar cómo varían los tiempos de cómputo al cambiar los parámetros de ancho y profundidad del método. Esto, se presenta en detalle en la sección 4.4.2.

La Figura 4-7 muestra el diagrama de flujo del modelo de simulación usado para ejecutar la técnica SRDM. La principal diferencia con respecto al modelo de simulación utilizado en el método GAS corresponde a la condición de término de la simulación, que en este caso utiliza un horizonte de simulación fijo. Adicionalmente, al ocurrir un evento de fin de descarga, el destino de despacho del camión es entregado por alguna de las metodologías recién descritas.

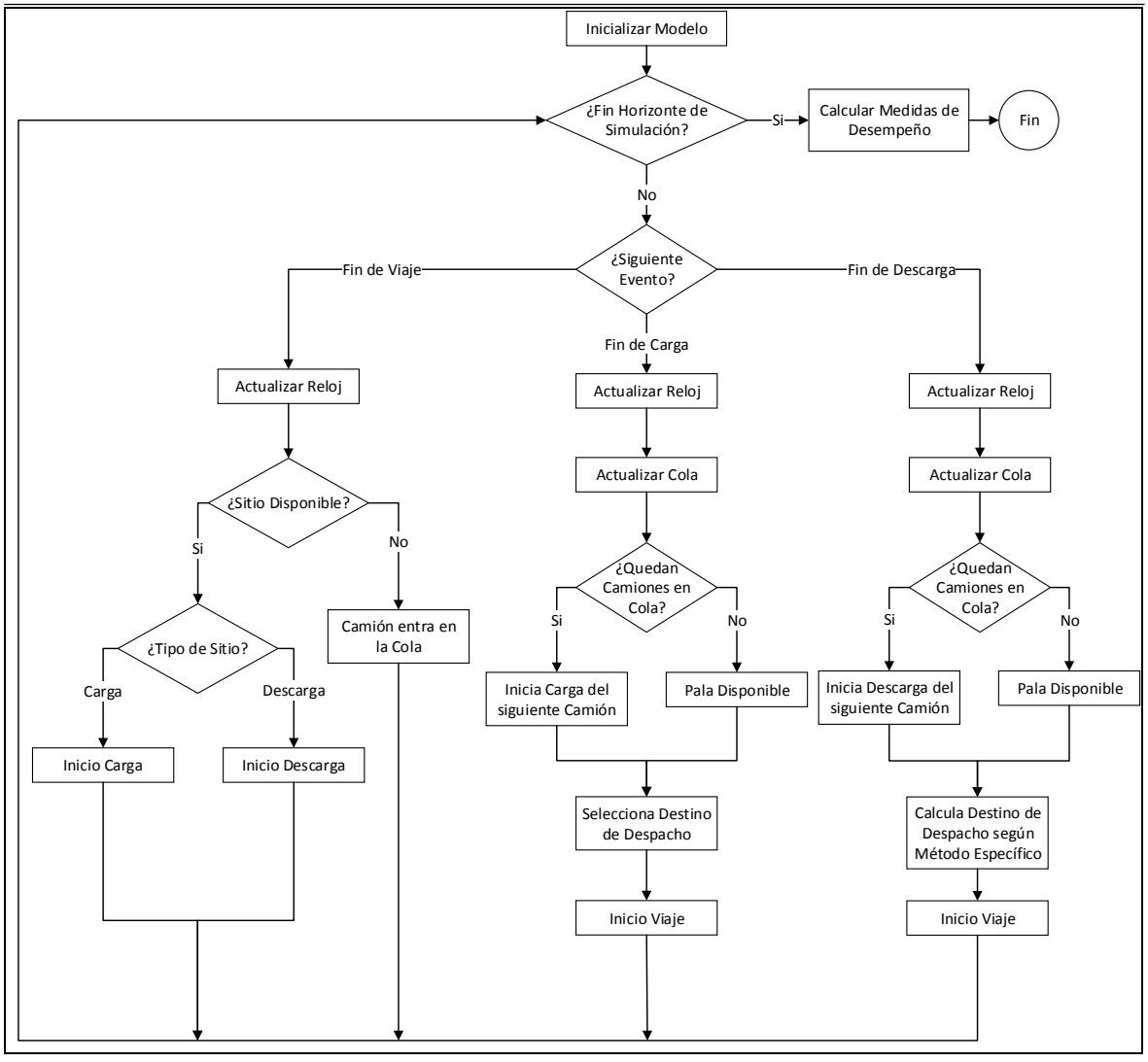


Figura 4-7. Diagrama de flujo del modelo de simulación on-line, técnica SRDM.

4.3.3 SRDM Mixto

SRDM Mixto surge de la combinación de las metodologías expuestas en los puntos anteriores. Esta metodología utiliza la técnica SRDM para evaluar el desempeño del método GAS, y los presentados por White y Olson (1992) y Li (1990) como alternativas para la toma de decisiones. La visibilidad que proporciona la técnica SRDM permite evaluar el comportamiento del método GAS en un número reducido

de combinaciones e indica si es conveniente seleccionarlo en caso que éste entregue resultados de mejor calidad que los otros métodos.

Sin embargo, esta técnica resulta más compleja que las anteriores, ya que involucra la toma de decisiones mediante simulación, a través del método GAS, para seleccionar el despacho de los camiones dentro de otra simulación. Esta última compara el desempeño del método GAS con el de las demás metodologías con la técnica SRDM. Por esto, el método requiere de un significativo esfuerzo computacional, que obliga a reducir drásticamente el ancho y la profundidad de la simulación on-line, además de la cantidad de soluciones evaluadas mediante el método GAS para tomar decisiones en tiempo real.

En la Figura 4-8 se ilustra el método SRDM Mixto, donde se observa que al momento de tomar una decisión de despacho, dentro de la simulación se utilizan diferentes métodos para la toma de decisiones. Particularmente, al usar GAS, debido a su funcionamiento se generan para cada asignación de destino la simulación del sistema al elegir cada una de las alternativas de despacho disponibles. En la figura esto se indica dentro de un rectángulo con líneas segmentadas.

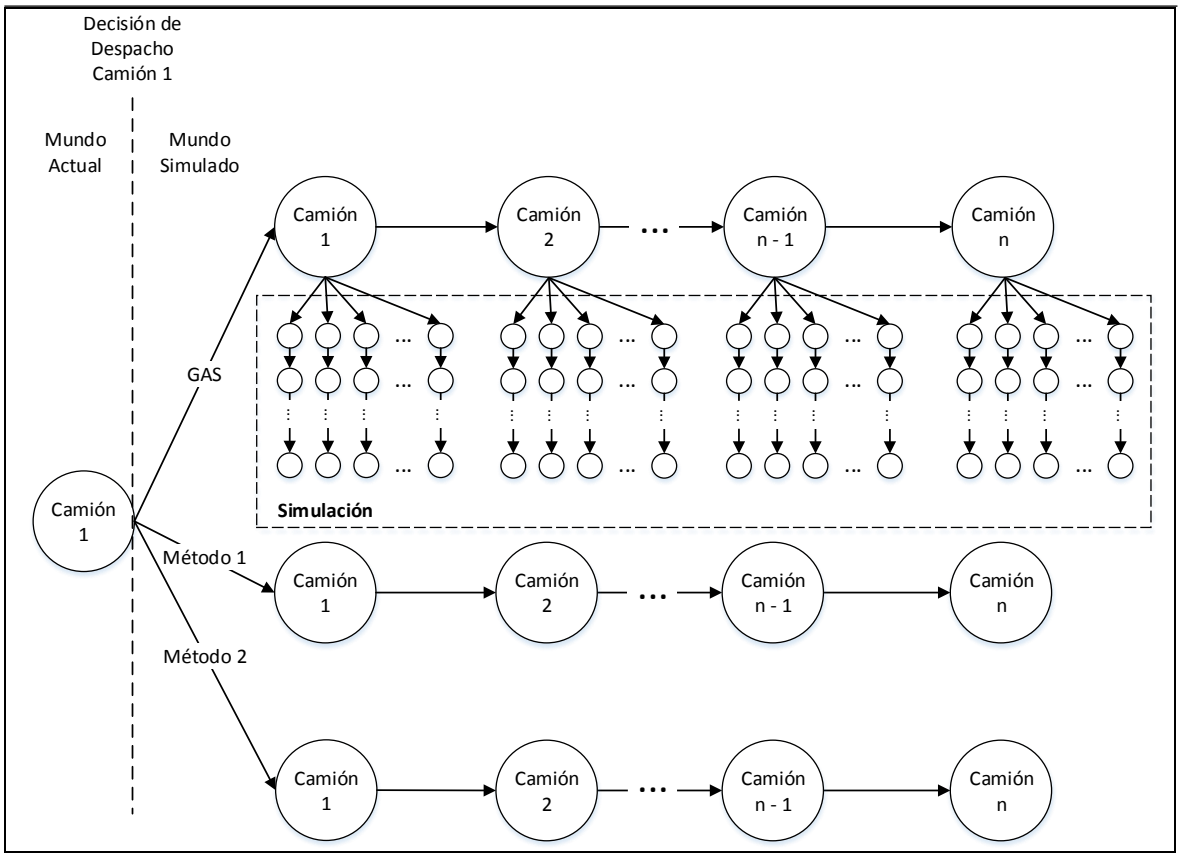


Figura 4-8. Esquema del funcionamiento del método SRDM Mixto.

En la sección 4.4.3 se presenta la estimación de los parámetros de ancho y profundidad a utilizar en este caso, medidos en función del impacto de la variación de éstos en la calidad de los resultados obtenidos y los tiempos de cómputo de la metodología.

4.4 Calibración del modelo de simulación on-line

El uso del modelo de simulación on-line para la toma de decisiones de despacho de camiones requiere de la calibración de ciertos parámetros para la obtención de resultados que se ajusten a los objetivos operacionales de la mina. De esta forma, la calidad de los resultados proporcionados por el uso de las distintas metodologías propuestas dependerá directamente del correcto ajuste de parámetros, tanto de la función objetivo, como de los valores de ancho y profundidad al utilizar las técnicas SRDM y SRDM Mixto.

4.4.1 Generación aleatoria de soluciones (GAS)

En la Figura 4-9 se muestra la variación de los valores para la ley promedio a chancado y razón estéril-mineral promedio para 50 réplicas de un turno de operación de la mina al utilizar distintas configuraciones de la función objetivo que se muestra en la ecuación (3-3).

$$F.O. = a\left(Ley_{Objetivo} - Ley_{Simulación}\right)^2 + b\left(Rem_{Objetivo} - Rem_{Simulación}\right)^2 \quad (4\text{-}3)$$

Los valores se obtuvieron luego de fijar el parámetro b en 1 y utilizar diferentes valores para el parámetro a. A partir de este análisis se observa la convergencia del valor de la ley promedio a chancado a un valor cercano a 0,85% cuando el parámetro a crece, mientras que la razón estéril-mineral promedio se aleja del valor objetivo 0,4 con el aumento del valor de a.

De esta forma, la presencia de un *trade-off* entre la desviación respecto a la ley objetivo a chancador y la razón estéril-mineral, obliga a seleccionar un punto de equilibrio, en que se alcance una ley promedio a chancado dentro de los rangos aceptados por la planta concentradora, sin tener una baja significativa en la extracción de estéril.

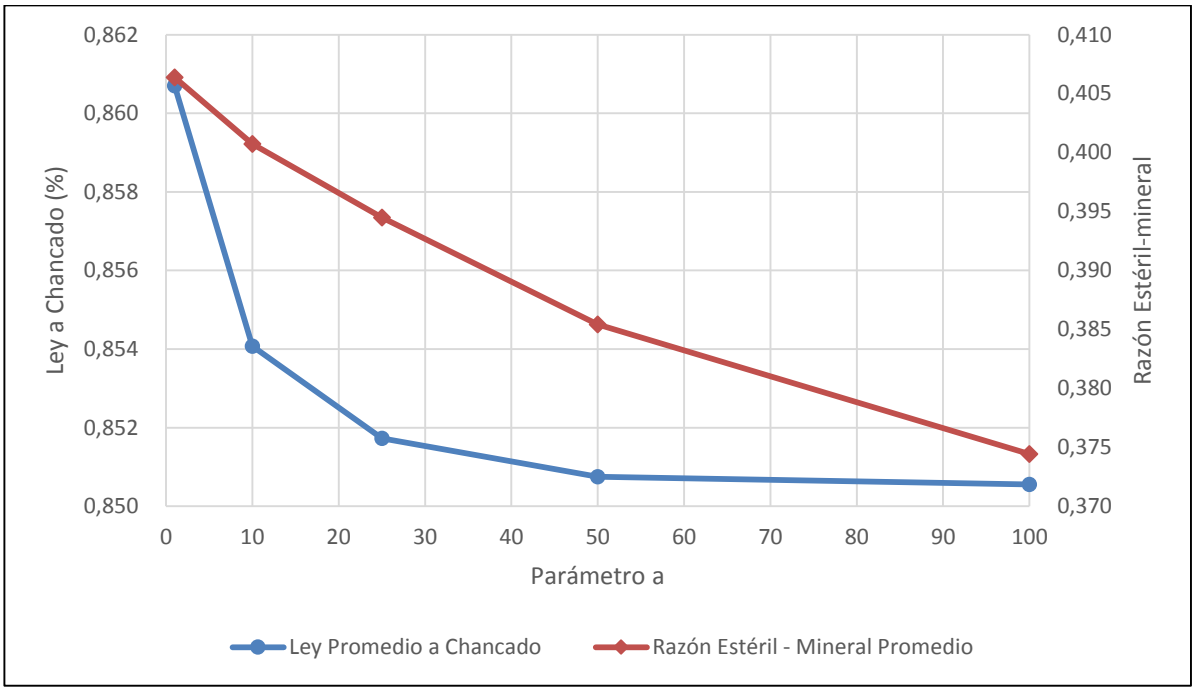


Figura 4-9. Calibración del modelo de simulación on-line, generación aleatoria de soluciones.

Por otra parte, la cantidad de combinaciones a evaluar al momento de tomar una decisión de despacho queda determinada por el tiempo de cómputo requerido. De esta forma, y exigiendo la obtención de una respuesta a la solicitud de despacho de un camión en menos de 1 segundo, se fija en 1.000 la cantidad de réplicas de la simulación utilizadas por el método GAS, que demora en promedio 0,9 segundos en determinar el próximo destino del camión. La Figura 4-10 muestra el tiempo de cómputo del método GAS, en relación al número de combinaciones evaluadas en cada decisión, o el número de réplicas de la simulación necesarias. Como se observa en la figura, a mayor número de réplicas de la simulación el tiempo de cómputo crece de manera lineal, por lo que es fundamental definir una cantidad de réplicas que permita obtener una buena solución en un intervalo de tiempo acotado.

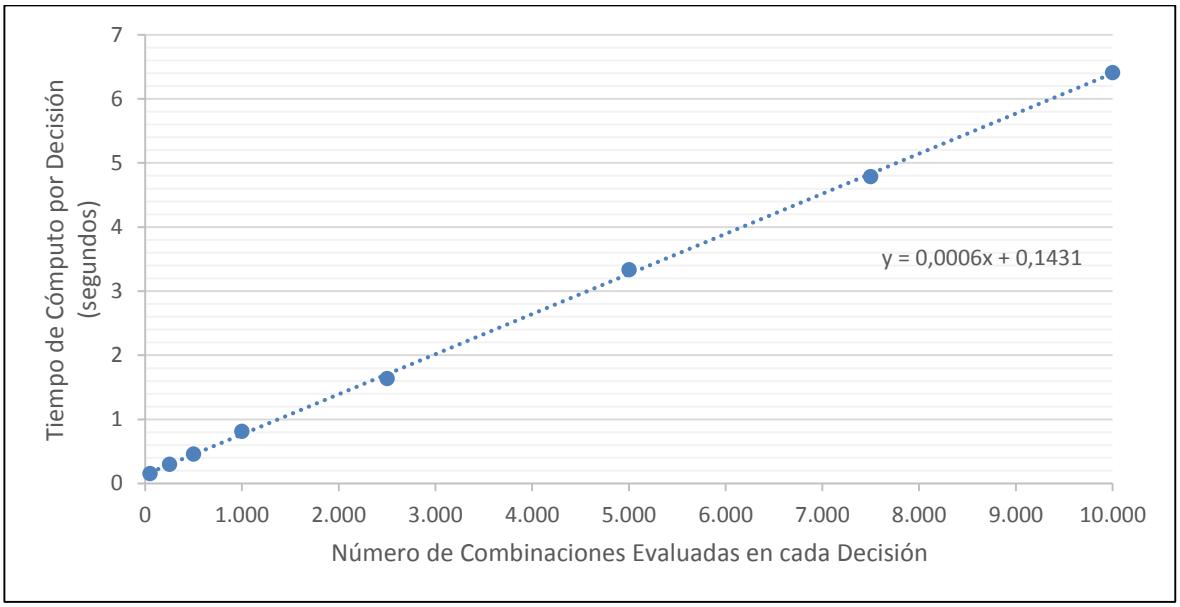


Figura 4-10. Tiempo medio de cómputo por número de combinaciones evaluadas en un despacho.

4.4.2 Técnica SRDM

Para el uso de la técnica SRDM, se buscó calibrar la función objetivo de manera similar al caso anterior, obteniendo resultados que no muestran variaciones significativas al cambiar los parámetros de peso de la función objetivo. En la Figura 4-11 se muestran los valores obtenidos para la ley promedio a chancado y razón estéril-mineral promedio al variar el parámetro b de la función objetivo. En este caso, se decide sensibilizar a través de este parámetro debido a que se obtiene un valor muy cercano al objetivo para la ley de alimentación a chancado, siendo la razón estéril-mineral la que presenta la mayor desviación.

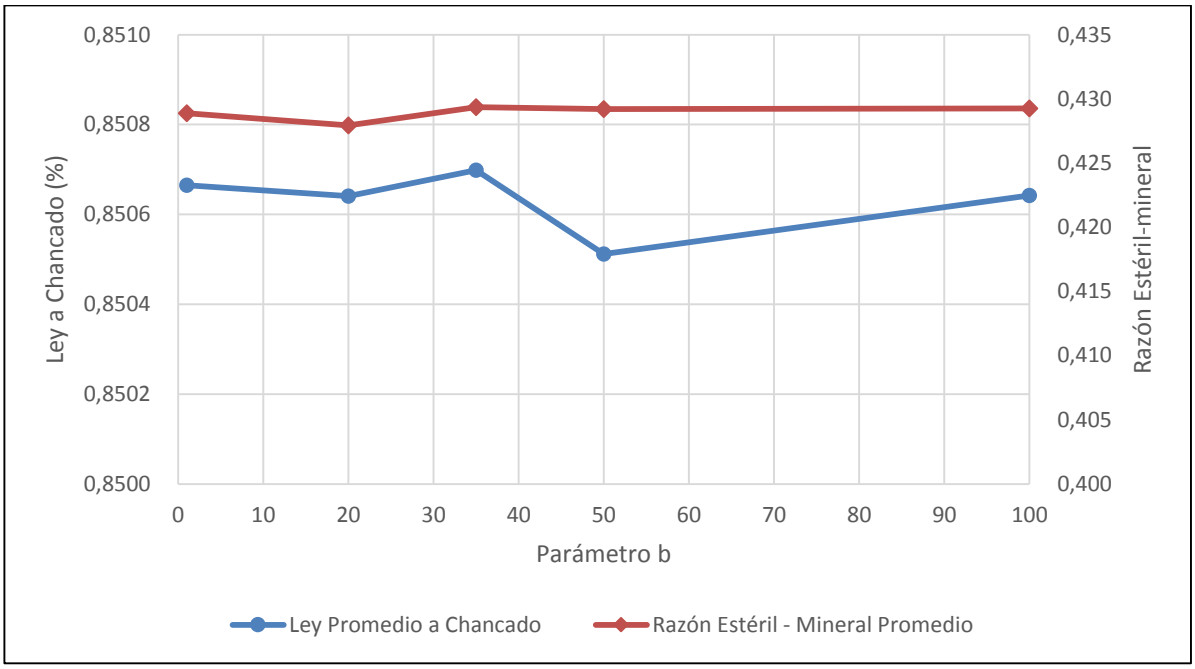


Figura 4-11. Calibración del modelo de simulación on-line, técnica SRDM.

Esta metodología requiere de la estimación de un ancho y profundidad adecuados para la correcta obtención de resultados, ya que al aumentar estos parámetros mejoran los resultados operacionales, pero a su vez aumenta el tiempo de cómputo requerido para la toma de decisiones. Debido a esto, resulta necesario construir las curvas de la Figura 4-12, donde se muestra la variación en la ley promedio a chancado y la razón estéril-mineral para distintos anchos. En la figura, no se observa una ningún tipo de convergencia para los valores de la ley promedio a chancado ni tampoco para la razón estéril-mineral, lo que dado por la variación en los tiempos de cómputo registrados, que se exponen en la Figura 4-13, sugieren utilizar 1 réplica como ancho del método, con el objetivo de mantener bajo el tiempo de cómputo y dar posibilidad al aumento en la profundidad del método que sí muestra resultados positivos en cuanto a las medidas de desempeño.

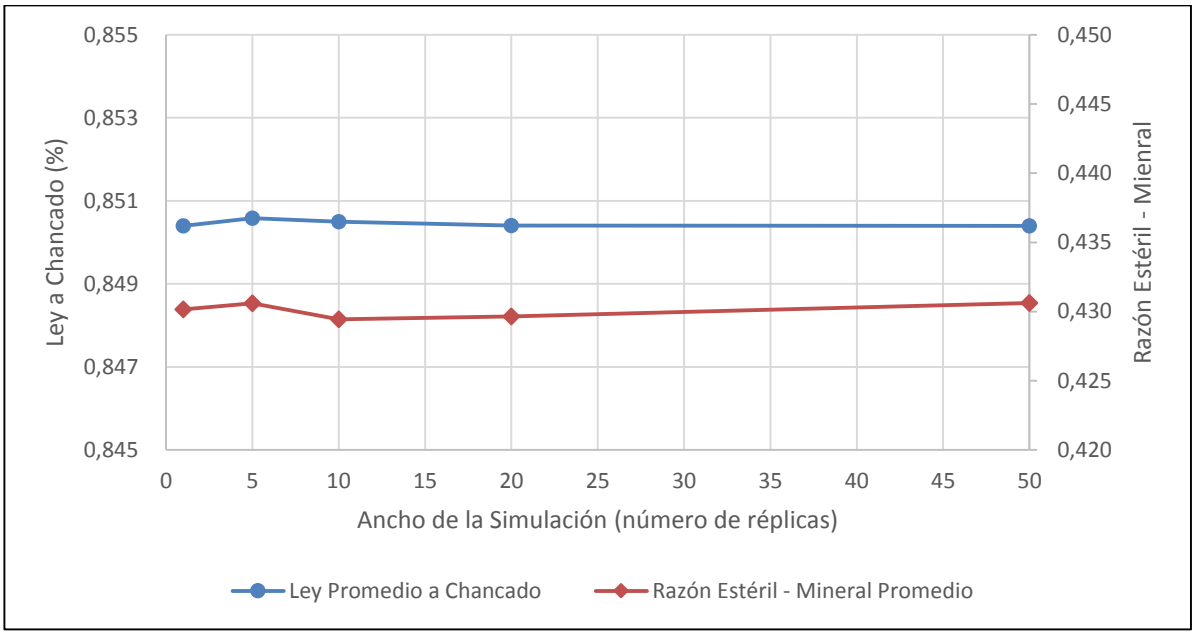


Figura 4-12. Calibración ancho de la simulación, técnica SRDM.

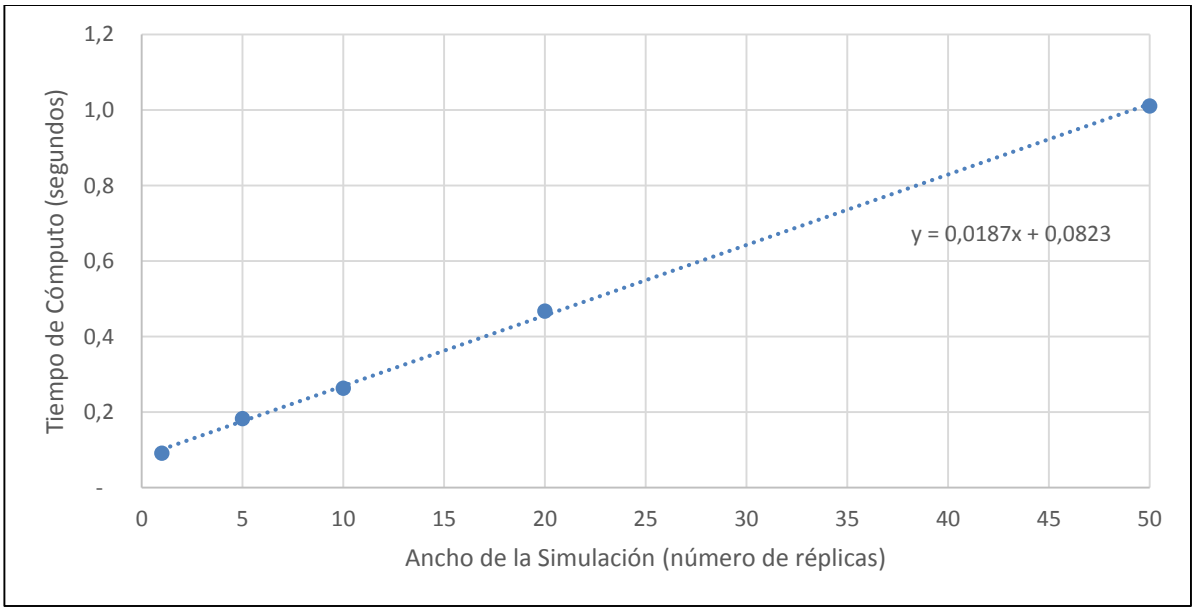


Figura 4-13. Calibración ancho de la simulación, técnica SRDM.

Para estimar la profundidad de la simulación se realizó un ejercicio similar, donde según se muestra en la Figura 4-14, la ley promedio a chancado se aleja del valor objetivo al aumentar la profundidad de la simulación, mientras que la desviación de la razón estéril-mineral en relación al objetivo disminuye. Esta situación se explica debido a que los parámetros de peso de la función objetivo son iguales a 1, por lo que a pesar de la mayor desviación en el valor de la ley de alimentación a chancado la mayor disminución en el valor de la razón estéril-mineral, genera un mejor resultado al ser evaluado en la función objetivo (ver ecuación (4-2)).

Como se muestra en la Figura 4-15, la profundidad máxima permitida es de 7 horas, con lo que mejora el valor de la razón estéril-mineral sin requerir más de 0,9 segundos en promedio para tomar una decisión de despacho. Sin embargo, el aumento de la profundidad de la simulación genera cambios favorables en relación a los valores medios registrados para las medidas de desempeño, pero al mismo tiempo produce un aumento en su variabilidad y una más lenta convergencia hacia un valor estable en el caso de la razón estéril-mineral. Esta situación se aprecia en la Figura 4-16 a Figura 4-19, para la ley de alimentación a chancado, y Figura 4-20 a Figura 4-23, para la razón estéril-mineral, donde se muestran mediciones de las variables cada 30 minutos de operación con sus respectivos intervalos de confianza, construidos en base a 50 réplicas de la simulación y un nivel de confianza de 95%.

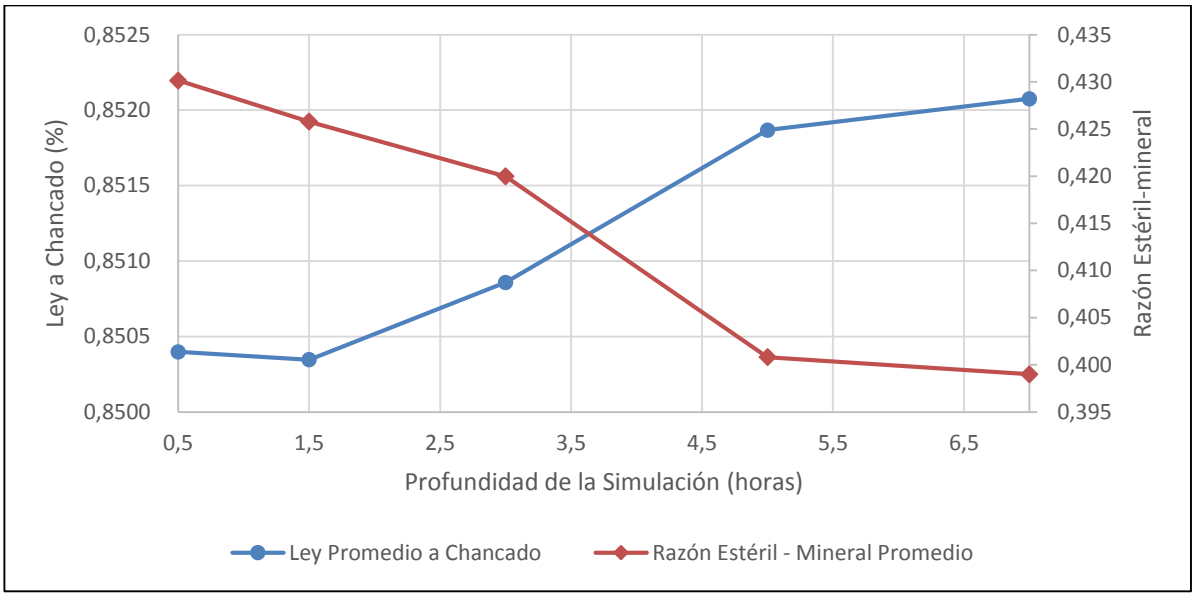


Figura 4-14. Calibración profundidad de la simulación, técnica SRDM.

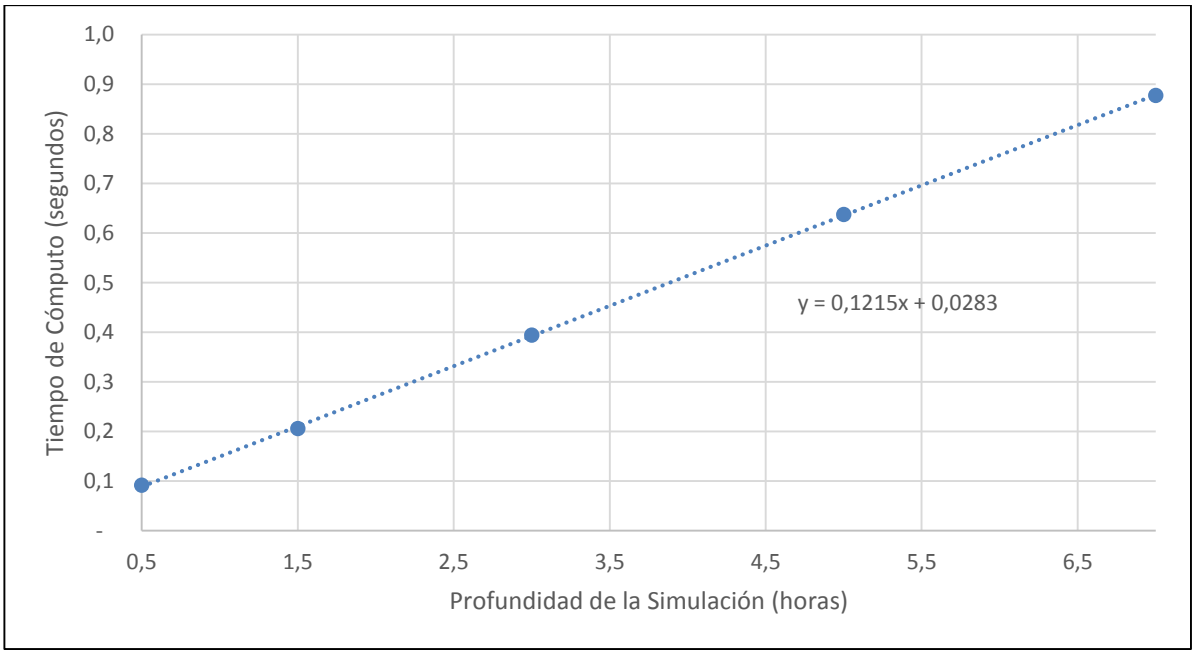


Figura 4-15. Calibración profundidad de la simulación, técnica SRDM

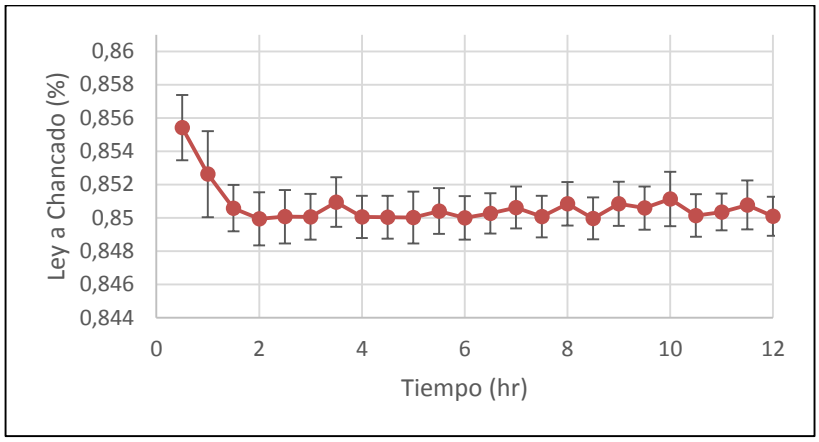


Figura 4-16. Ley de mineral a chancado, profundidad de la simulación 1,5 horas.

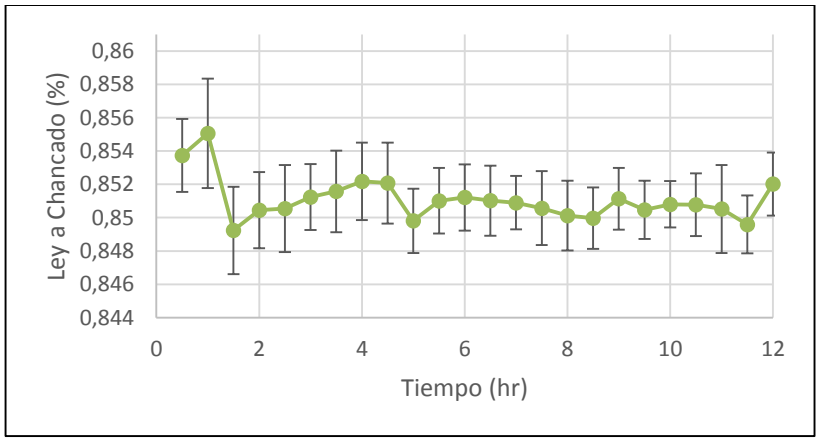


Figura 4-17. Ley de mineral a chancado, profundidad de la simulación 3 horas.

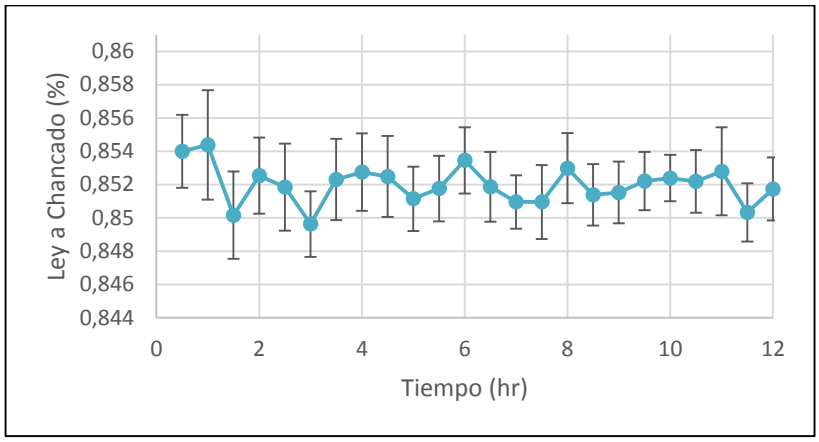


Figura 4-18. Ley de mineral a chancado, profundidad de la simulación 5 horas.

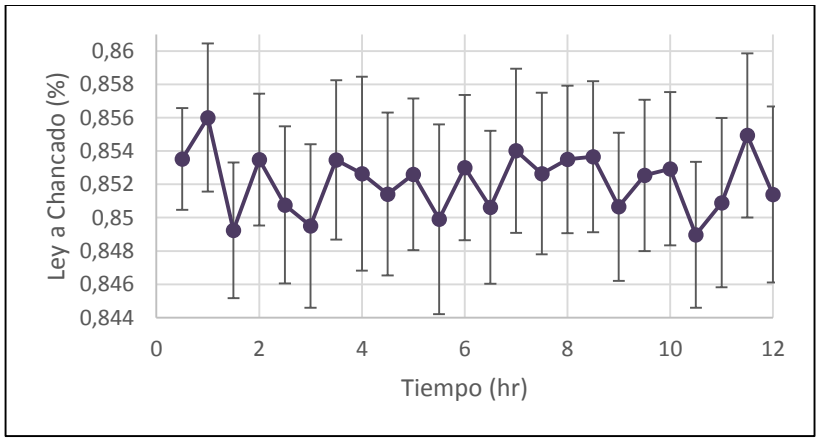


Figura 4-19. Ley de mineral a chancado, profundidad de la simulación 7 horas.

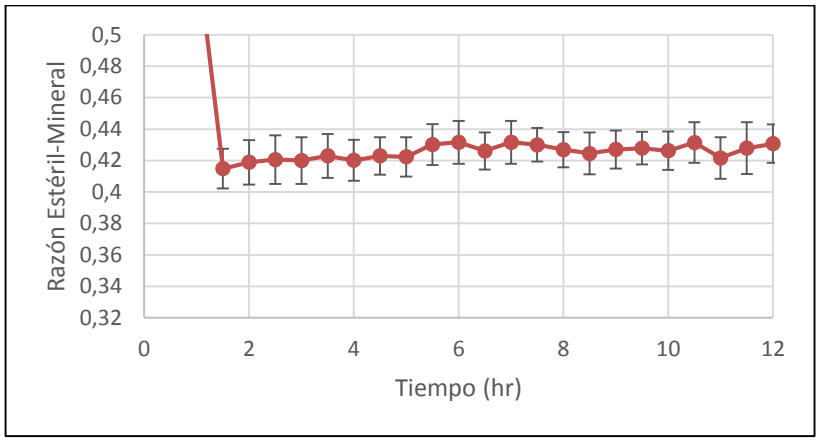


Figura 4-20. Razón estéril-mineral, profundidad de la simulación 1,5 horas.

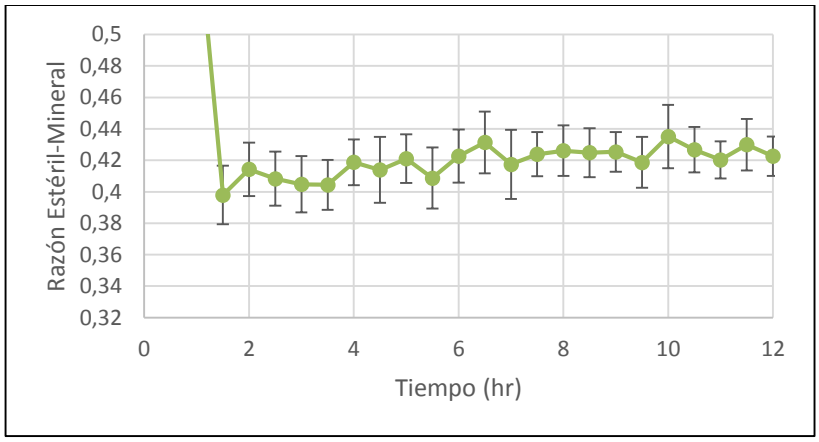


Figura 4-21. Razón estéril-mineral, profundidad de la simulación 3 horas.

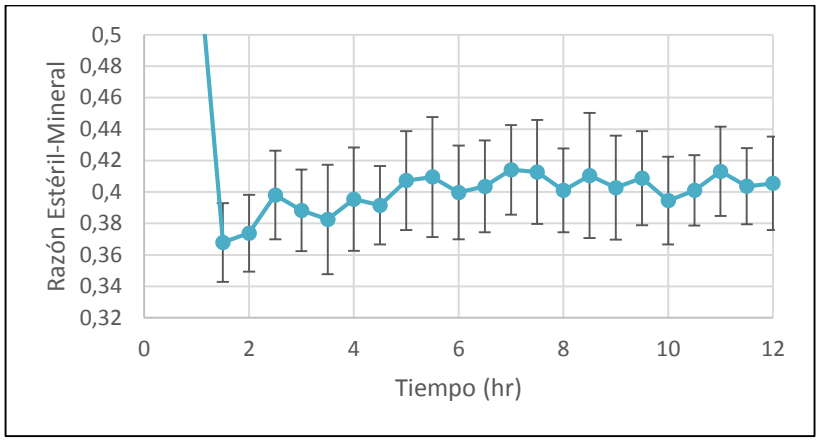


Figura 4-22. Razón estéril-mineral, profundidad de la simulación 5 horas.

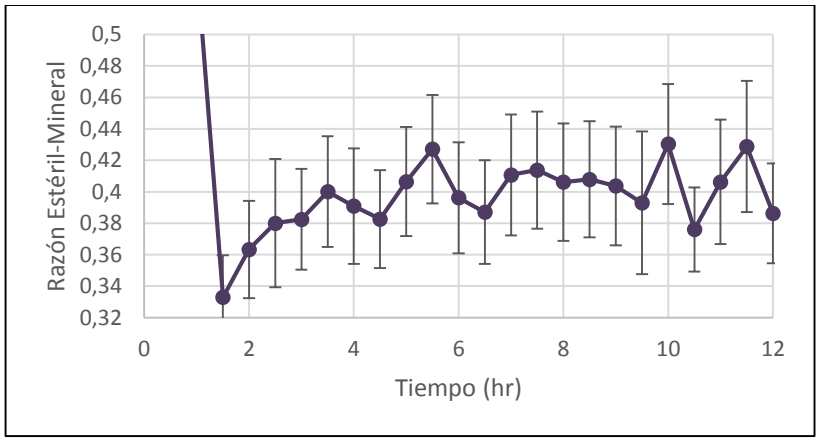


Figura 4-23. Razón estéril-mineral, profundidad de la simulación 7 horas.

4.4.3 SRDM Mixto

En este caso, debido al uso del método GAS dentro de las evaluaciones que realiza la técnica SRDM Mixto, el aumento tanto del ancho como de la profundidad del método genera incrementos mucho mayores en el tiempo de cómputo que los estudiados en el caso anterior, convirtiéndose en la principal limitante del método. La Figura 4-24 muestra el tiempo de cómputo del método en función del ancho de la simulación.

De esta forma, se fija en 1 réplica el ancho de la simulación, con el objetivo de mantener el tiempo de cómputo bajo 1 segundo y permitir la mejora de los resultados del método por medio del aumento de la profundidad de la simulación.

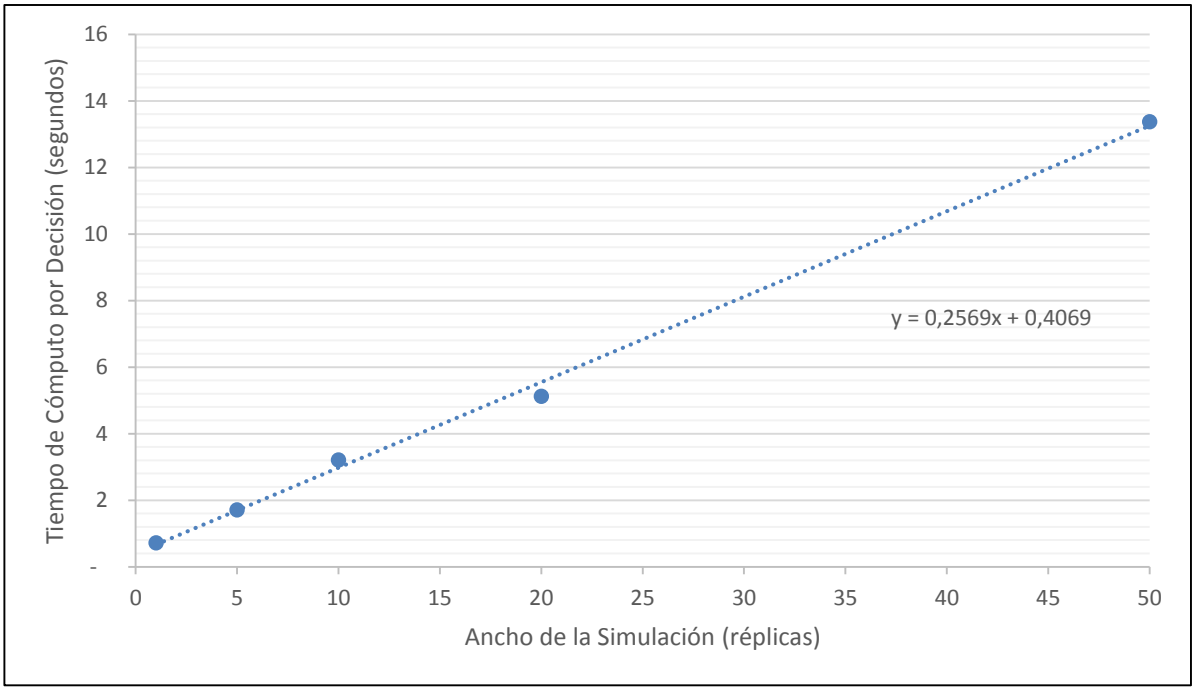


Figura 4-24. Calibración ancho de la simulación, SRDM Mixto.

En la Figura 4-25 se muestran los resultados obtenidos para ley de alimentación a chancado promedio y razón estéril-mineral promedio para distintos valores de la profundidad de la simulación, en que se observa una ley a chancado cercana al objetivo de 0,85% para todos los valores de profundidad evaluados. De la misma forma, para la razón estéril-mineral, al aumentar la profundidad de la simulación el valor de la variable no cambia de manera significativa, manteniéndose cercano al objetivo de 0,4.

La relación que se produce entre aumento de la profundidad y tiempo de cómputo se muestra en la Figura 4-26, que sugiere la utilización de una profundidad de 0,5 horas para la simulación, debido a que mantiene el tiempo promedio de cómputo bajo un 1 segundo con resultados de la misma calidad que los obtenidos con valores de profundidad mayores.

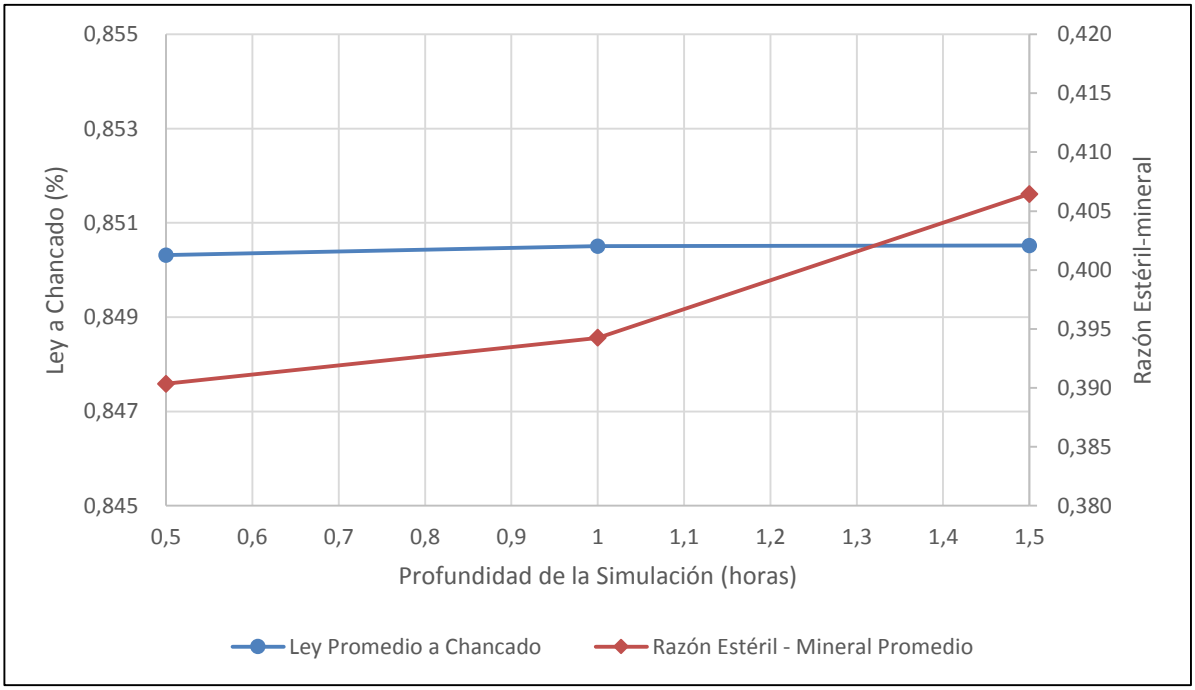


Figura 4-25. Calibración profundidad de la simulación, SRDM Mixto.

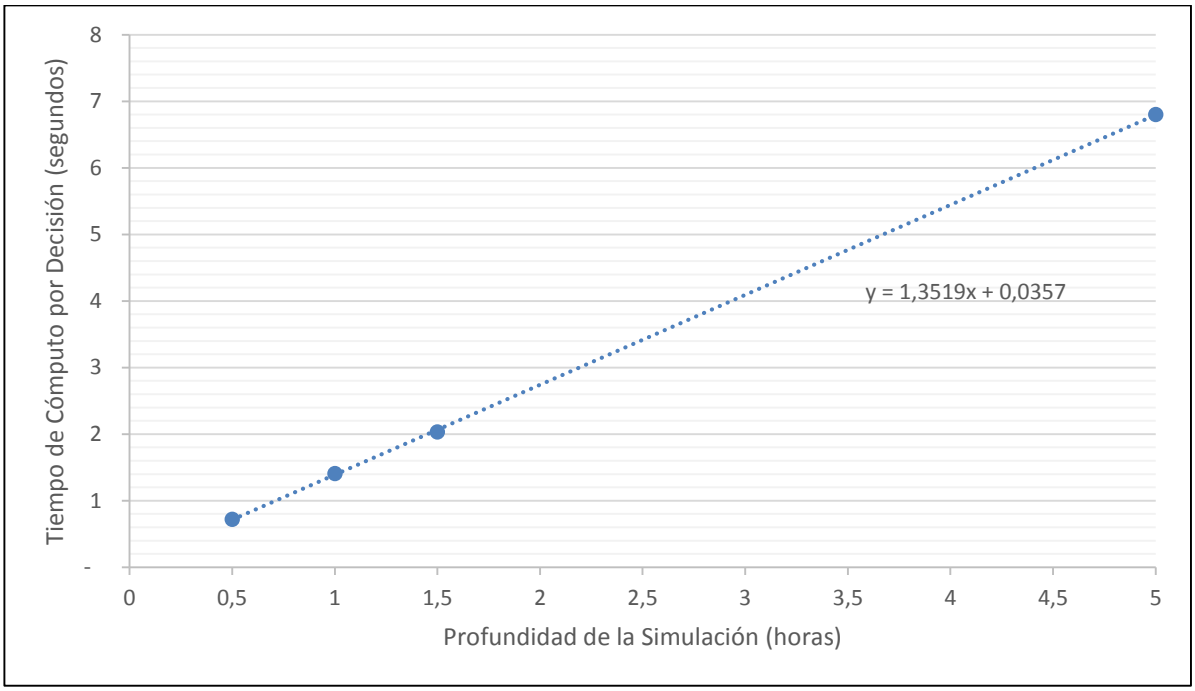


Figura 4-26. Calibración profundidad de la simulación, SRDM Mixto.

Es importante mencionar que todos los tiempos de cómputo recién expuestos fueron registrados en un equipo con un procesador Intel ® Core™ i7-2600 de 3,4 GHz y 8 Gb de memoria RAM instalada.

5 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SIMULACIÓN

El resultado del estudio de simulación consiste en una comparación del comportamiento de las diferentes metodologías de despacho de camiones bajo iguales condiciones y en diferentes escenarios. Las metodologías de despacho evaluadas se presentan la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Métodos de despacho de camiones utilizados en el estudio.

Clasificación de los Métodos	Metodología de despacho
Heurísticas	Maximizar camiones (MC) Minimizar la desviación de los objetivos de producción (MDP)
Siguen flujos de material	White y Olson (1992) Li (1990) Temeng et al. (1997)
Basados en Simulación On-line	GAS SRDM SRDM Mixto

Como variable de entrada de todas las metodologías evaluadas se utilizaron los datos resultantes del modelo de asignación de flujos de material propuesto por Ta et al. (2010), que entrega el flujo de material que debe acarrearse desde cada pala a su punto de vaciado correspondiente y la dotación óptima de camiones de la mina. Los flujos de material a acarrear entregados por el modelo de muestran la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Flujos de material a acarrear desde cada pala.

	Escenario base, 1 y 2	Escenario 3
Flujo de Material (Ton/hr)	Pala 1: 5.450 Pala 2: 4.979 Pala 3: 1.724 Pala 4: 5.678 Pala 5: 4.639	Pala 1: 5.698 Pala 2: 2.296 Pala 3: 877 Pala 4: 5.883 Pala 5: 4.639

El escenario base corresponde a una situación ideal, donde se utiliza una dotación óptima de camiones según las necesidades de acarreo, de 30 camiones. Adicionalmente, las palas disponen de leyes de mineral que resultan simples de mezclar para lograr la ley objetivo que se debe enviar a chancado.

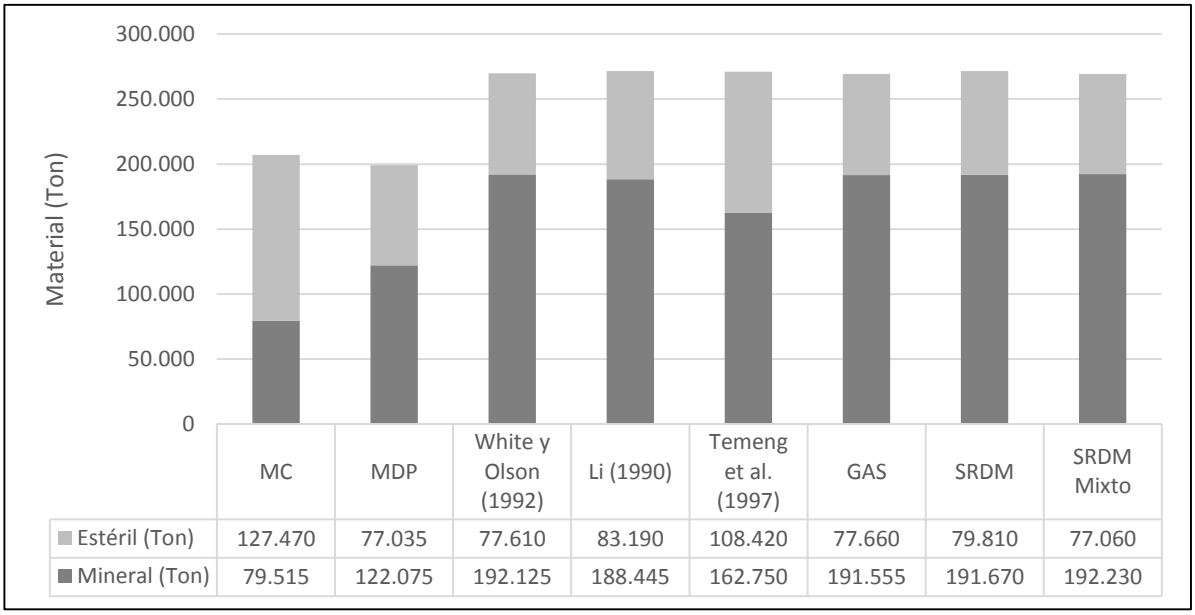
El escenario 1 presenta la dificultad de operar con un número de camiones inferior a la dotación óptima, de 25 camiones, lo que entorpece el cumplimiento de la tasa de alimentación a chancado cuando se busca cumplir con restricciones de ley objetivo a planta y mantener una razón estéril-mineral determinada.

El escenario 2 corresponde a un caso que considera sobredotación de camiones, con 35 camiones, lo que facilita el cumplimiento de la tasa de alimentación del chancador, pero genera congestión en los puntos de carga y vaciado, aumentando el tiempo promedio de espera en colas y distorsionando las decisiones tomadas por algunas metodologías.

El escenario 3 considera nuevamente una dotación óptima de camiones según las necesidades de acarreo, de 30 camiones, pero esta vez las leyes de mineral disponibles en las palas dificultan la obtención de la ley objetivo que se debe enviar a chancado, ya que ninguna pala proporciona mineral con ley cercana objetivo, sino que necesariamente se deben realizar mezclas para lograrlo.

5.1 Escenario base

En la Figura 5-1 se muestran los resultados generales del uso de las distintas metodologías de despacho en el escenario base, representados por la media de la cantidad total de mineral y estéril acarreados durante un turno de operación. En este caso, el método que presenta el mayor acarreo es Li (1990), moviendo un 36% más de material respecto a la metodología con menor acarreo (MDP), mientras que la diferencia con respecto a los métodos basados en simulación on-line es de 0,9%, 0,1% y 0,9% para GAS, SRDM y SRDM Mixto, respectivamente.



	MC	MDP	White y Olson (1992)	Li (1990)	Temeng et al. (1997)	GAS	SRDM	SRDM Mixto
Estéril (Ton)	127.470	77.035	77.610	83.190	108.420	77.660	79.810	77.060
Mineral (Ton)	79.515	122.075	192.125	188.445	162.750	191.555	191.670	192.230

Figura 5-1. Movimiento de material total, escenario base.

Sin embargo, los resultados mostrados no entregan información del real desempeño de los métodos en términos de desviación respecto de los objetivos operacionales de leyes de mineral a chancado, razón estéril-mineral y alimentación a chancador, que dado las diferencias existentes para el material total acarreado se vuelven relevantes de comparar entre un método u otro. Para representar esta información se exponen

comparaciones en los gráficos de la Figura 5-2 a Figura 5-25, donde se muestra en detalle el comportamiento de las medidas de desempeño cada 30 minutos de operación, con el valor medio y su respectivo intervalo de confianza construido con un nivel de confianza del 95%. Las mediciones se realizan cada 30 minutos, ya que con esto es posible estudiar la convergencia de las metodologías hasta un valor estable para las medidas de desempeño. Cabe recordar que el modelo de simulación se inicializa con todos los camiones comenzando viajes desde el chancador, por lo que la duración del estado transiente del sistema dependerá del método de despacho utilizado, y de su capacidad para llevar al sistema a un estado estacionario.

5.1.1 Métodos heurísticos

Respecto a los métodos heurísticos, MC y MDP, son los que presentan los peores resultados en términos de cumplimiento de los objetivos operacionales. En el caso de MC, debido a que el objetivo del método es maximizar la producción a través del aumento en la utilización de los camiones, la ley de mineral a chancado se encuentra alejada del valor objetivo durante todo el turno de operación, ya que no existe una restricción que imponga un costo asociado a esta desviación. Por otra parte, MDP presenta un valor medio para la ley de mineral a chancado de 0,849% en el global del turno, pero una alta variabilidad que genera intervalos de confianza amplios y que durante algunos intervalos de tiempo no consideran la ley objetivo dentro de sus rangos (ver Figura 5-2 y Figura 5-3).

En cuanto a la razón estéril mineral, ninguno de los métodos heurísticos cumple con el valor de 0,4 propuesto como objetivo, logrando una extracción de estéril muy por encima de la deseada (ver Figura 5-10 y Figura 5-11). Al mismo tiempo, la alimentación a chancado se encuentra por debajo de la meta impuesta de 8.000 Ton cada 30 minutos (Tabla 3-4) (ver Figura 5-18 y Figura 5-19).

5.1.2 Métodos que siguen flujos de material

Entre las metodologías presentadas destacan los resultados para la ley de alimentación a planta obtenidos por el método de Li (1990) por su baja variabilidad, que genera estrechos intervalos de confianza (ver Figura 5-5), no así el método de White y Olson (1992), que aunque presenta una ley media global cerca al valor objetivo, presenta mayor variabilidad en los resultados entregados, existiendo intervalos de confianza durante el turno que no incluyen el valor objetivo de 0,85% (ver Figura 5-5). En el caso del método de Temeng et al. (1997), además de presentar una variabilidad mayor que los anteriores, la desviación con respecto al valor objetivo hace que en ningún momento del turno de operación se envíe a la planta concentradora la ley de mineral requerida por ésta (ver Figura 5-6).

En cuanto a la razón estéril-mineral, los tres métodos recién mencionados presentan una baja variabilidad, pero el método de White y Olson (1992) es el que proporciona los resultados más cercanos al valor objetivo (ver Figura 5-12) con una media global de 0,42; mientras los métodos de Li (1990) y Temeng et al. (1997) se alejan del objetivo con valores medios de 0,45 y 0,68; respectivamente, que se mantienen estables durante todo el turno de operación (ver Figura 5-13 y Figura 5-14).

Respecto a la alimentación a chancador, los métodos de White y Olson (1992) y Li (1990) presentan una alimentación que supera la tasa exigida por el chancador, luego de 2 horas de operación del turno, cuando se logra una alimentación estable (ver Figura 5-20 y Figura 5-21), mientras que el método de Temeng et al. (1997) nunca alcanza la alimentación exigida por la planta durante el turno de operación (ver Figura 5-22), debido a la mayor utilización de los camiones para el acarreo de estéril.

5.1.3 Métodos basados en simulación on-line

Los métodos basados en simulación on-line presentan los resultados con la más baja variabilidad para los valores de ley de mineral a chancado entre las metodologías evaluadas, con un ancho máximo para el intervalo de confianza de 0,0023%, y un

valor medio levemente por encima del objetivo para los métodos GAS y SRDM (ver Figura 5-7 y Figura 5-8), donde el método SRDM Mixto presenta los resultados más ajustados al objetivo, con un valor medio de 0,85% (ver Figura 5-9). Es importante mencionar que una baja desviación y variabilidad con respecto a la ley objetivo impuesta por la planta concentradora de mineral, impacta directamente en los costos asociados a los procesos químicos que en ésta se realizan. Esto, debido a que la cantidad y concentración de los reactivos utilizados para procesos como la flotación de mineral, se calcula en función de la ley del mineral a tratar, bajando la recuperación de la planta de tratamiento, y con esto, aumentando la cantidad de mineral no aislado durante los procesos de concentrado.

Respecto a la razón estéril-mineral es nuevamente el método SRDM Mixto el que presenta los mejores resultados, siendo éstos a su vez los mejores entre todos los métodos evaluados en cuanto a la desviación de su media respecto al valor objetivo, con una baja variabilidad durante todo el turno de operación (ver Figura 5-17).

Respecto a la alimentación a chancado, todos los métodos basados en simulación on-line evaluados superan la meta de alimentación establecida luego de alcanzar la estabilidad, tras 2 horas de operación (ver Figura 5-23, Figura 5-24 y Figura 5-25). En el caso del método SRDM Mixto, la tasa de alimentación a chancador supera la requerida en un 2,8%, lo que significa que a través de éste método sería posible cumplir con los objetivos de producción incluso con una menor disponibilidad de recursos, reduciendo de esta forma los costos de operación asociados al transporte de mineral.

5.1.4 Análisis general

La Tabla 5-3 resume los resultados globales obtenidos para el escenario base, según valores medios medidos cada 30 minutos de operación dentro de la simulación.

Tabla 5-3. Resumen de resultados, escenario base.

	Ley de Alimentación a Chancado		Razón Estéril-mineral		Alimentación a Chancado	
Metodología	Media (%)	Coeficiente de Variación	Media	Coeficiente de Variación	Media (Ton/30 min)	Coeficiente de Variación
MC	0,858	0,002	1,62	0,12	3.313	0,09
MDP	0,849	0,021	0,84	0,33	5.085	0,12
White y Olson (1992)	0,852	0,003	0,42	0,24	8.004	0,12
Li (1990)	0,851	0,002	0,45	0,20	7.849	0,11
Temeng et al. (1997)	0,868	0,004	0,68	0,07	6.779	0,10
GAS	0,852	0,001	0,42	0,23	7.980	0,11
SRDM	0,852	0,002	0,43	0,22	7.985	0,12
SRDM Mixto	0,850	0,001	0,41	0,24	8.008	0,12

En la tabla resumen se observa como el método SRDM Mixto entrega mejores resultados en todas las medidas de desempeño evaluadas, caracterizado además por un comportamiento poco variable durante la operación.

Adicionalmente, cabe destacar que en este estudio el método SRDM Mixto se implementó con una cantidad mínima de réplicas para la simulación on-line, una profundidad de sólo 30 minutos y la evaluación de sólo una solución mediante el método GAS que se evalúa como parte del proceso, lo que indica que los resultados proporcionados por esta metodología podrían tener un potencial de mejora importante al contar con un computador que permita disminuir los tiempos cómputo.

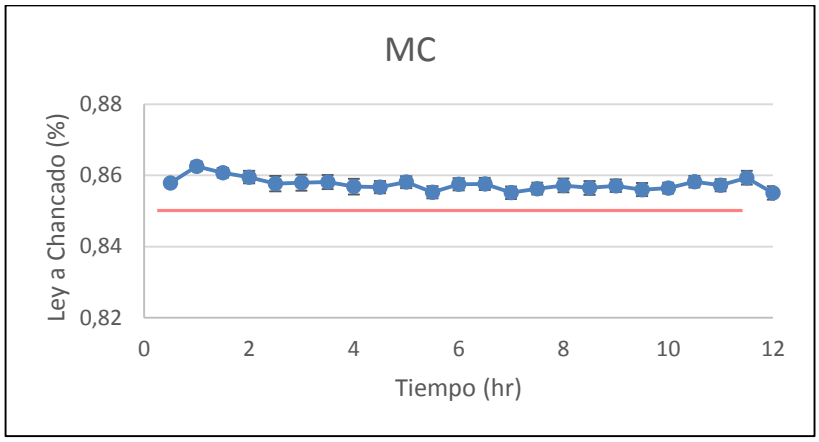


Figura 5-2. Ley de mineral a chancado, MC, escenario base.

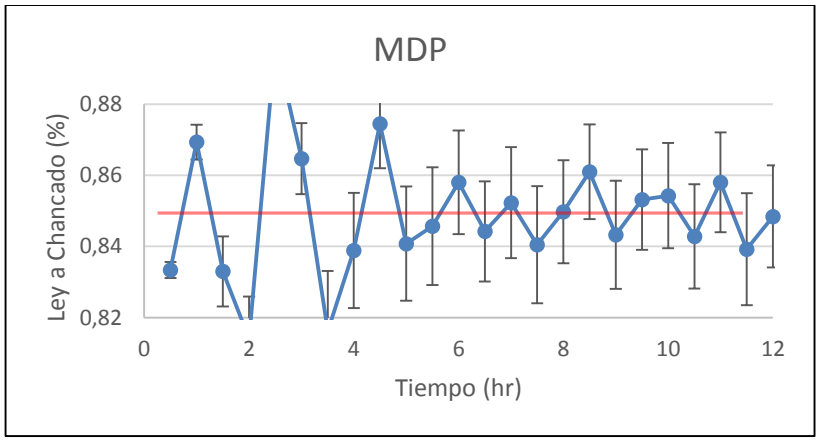


Figura 5-3. Ley de mineral a chancado, MDP, escenario base.

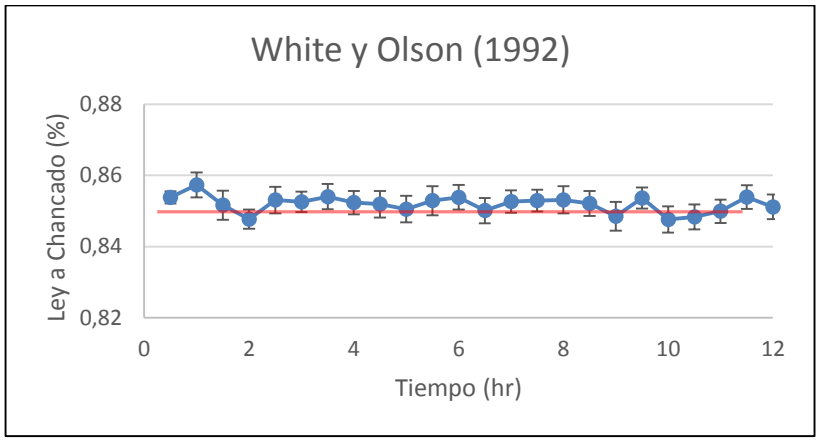


Figura 5-4. Ley de mineral a chancado, White y Olson (1992), escenario base.

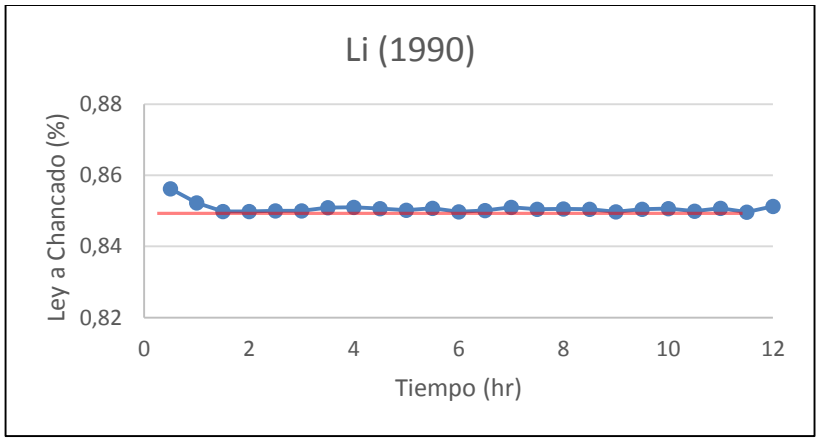


Figura 5-5. Ley de mineral a chancado, Li (1990), escenario base.

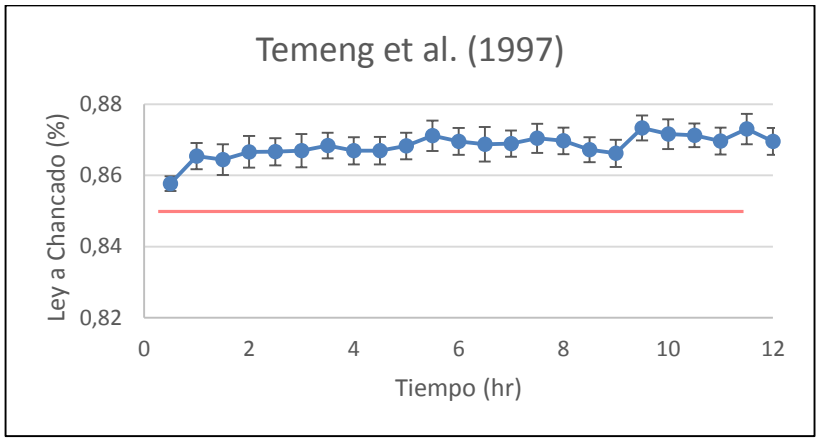


Figura 5-6. Ley de mineral a chancado, Temeng et al. (1997), escenario base.

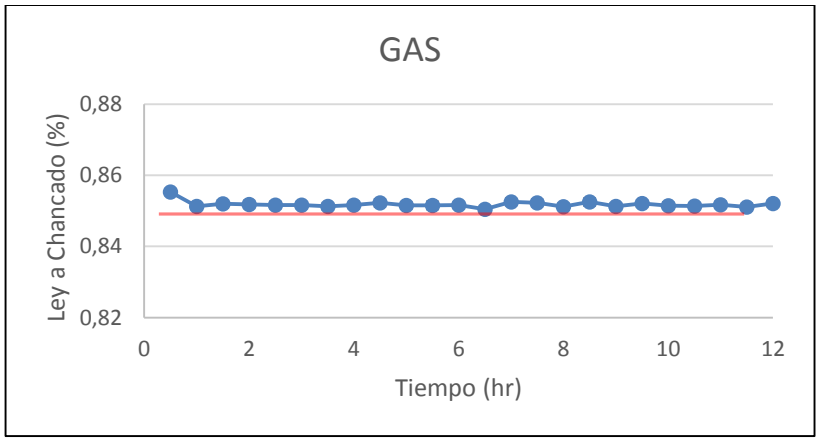


Figura 5-7. Ley de mineral a chancado, GAS, escenario base.

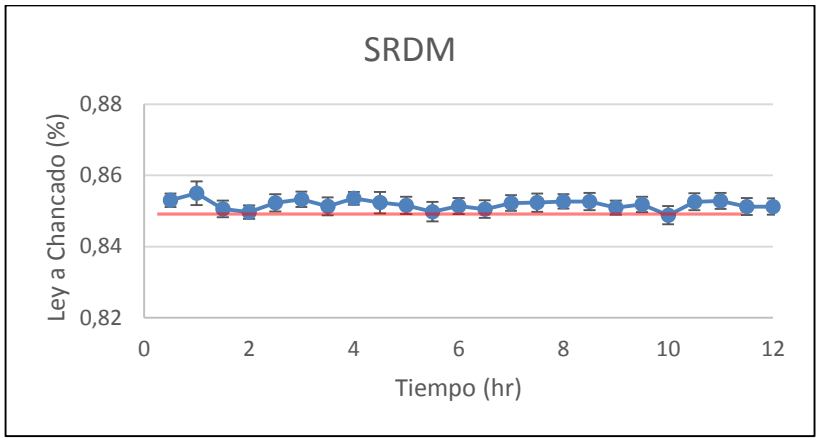


Figura 5-8. Ley de mineral a chancado, SRDM, escenario base.

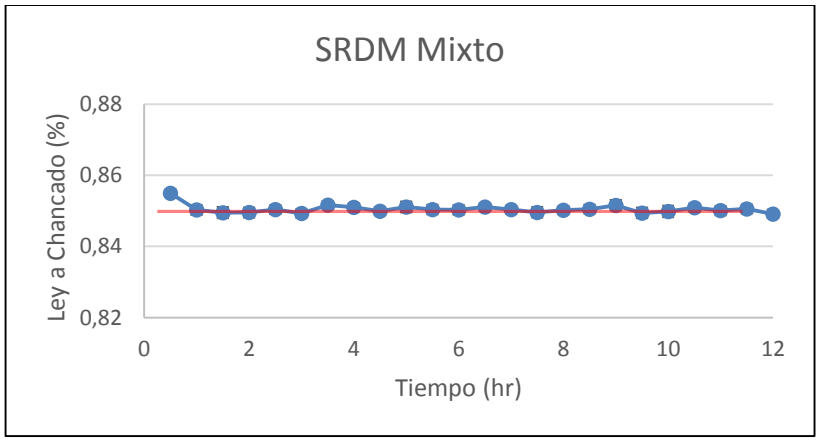


Figura 5-9. Ley de mineral a chancado, SRDM Mixto, escenario base.

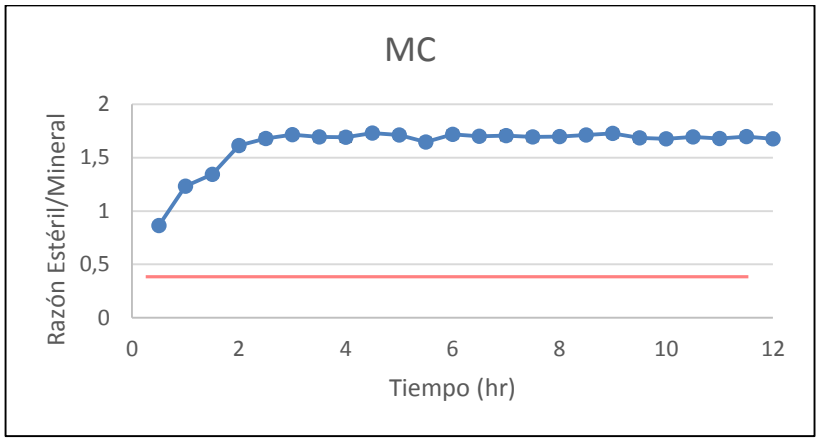


Figura 5-10. Razón estéril-mineral, MC, escenario base.

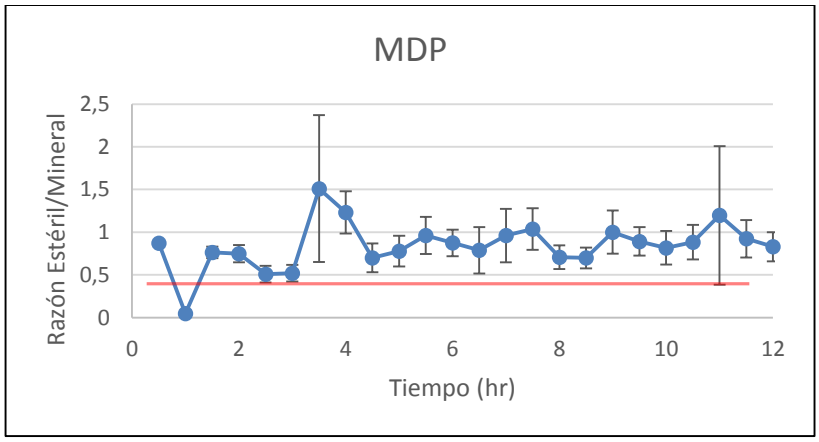


Figura 5-11. Razón estéril-mineral, MDP, escenario base.

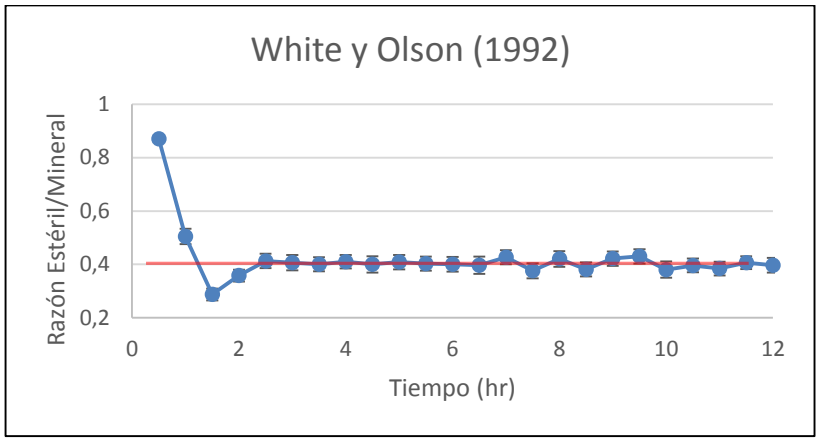


Figura 5-12. Razón estéril-mineral, White y Olson (1992), escenario base.

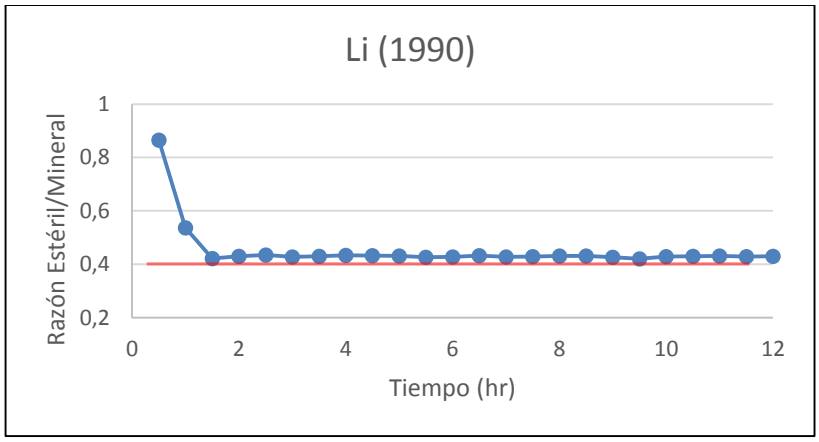


Figura 5-13. Razón estéril-mineral, Li (1990), escenario base.

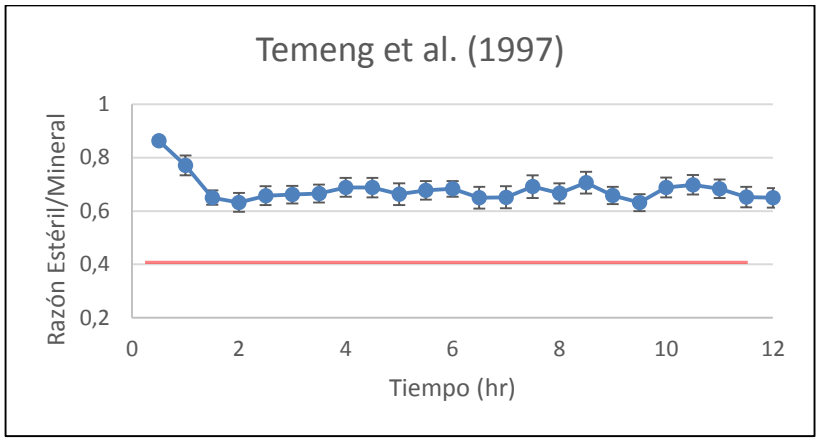


Figura 5-14. Razón estéril-mineral, Temeng et al. (1997), escenario base.

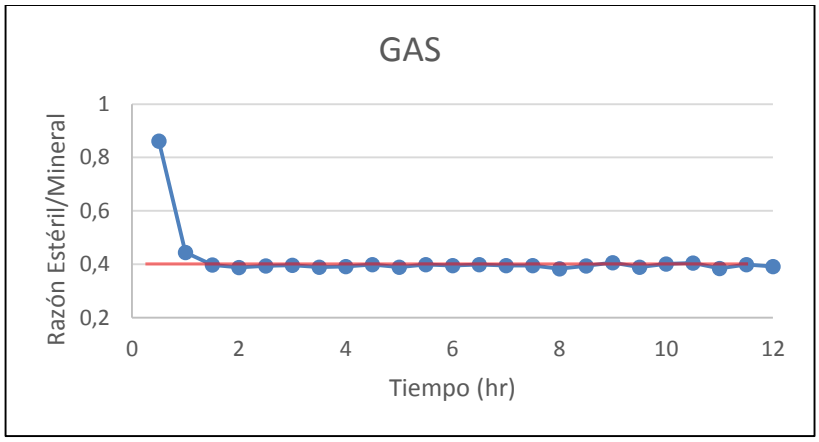


Figura 5-15. Razón estéril-mineral, GAS, escenario base.

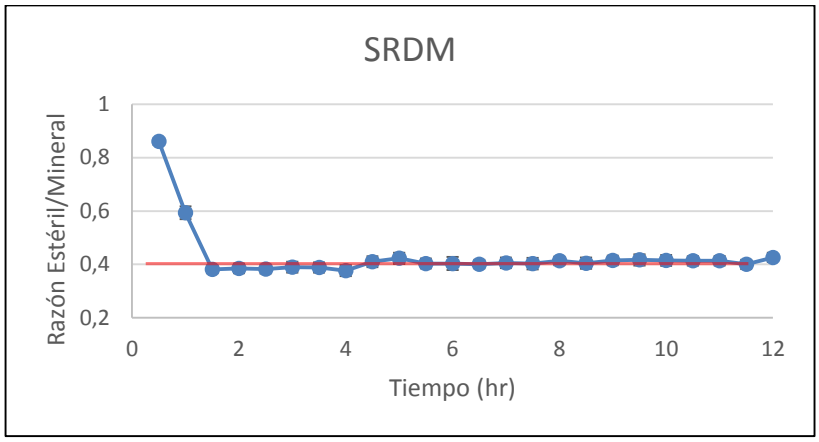


Figura 5-16. Razón estéril-mineral, SRDM, escenario base.

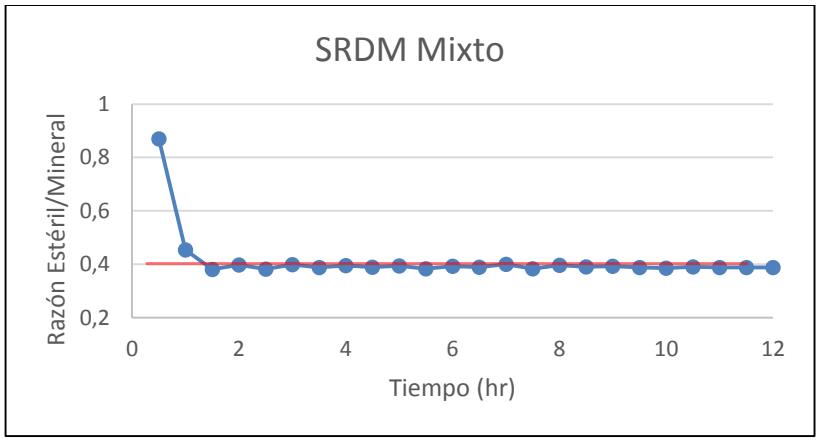


Figura 5-17. Razón estéril-mineral, SRDM Mixto, escenario base.

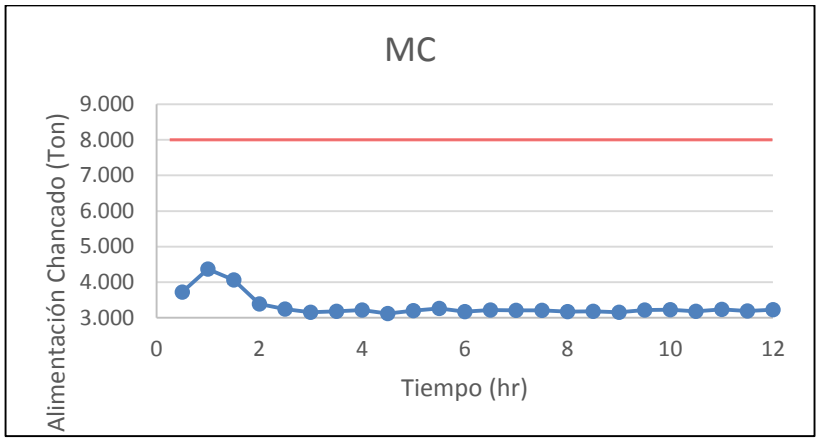


Figura 5-18. Alimentación a chancador, MC, escenario base.

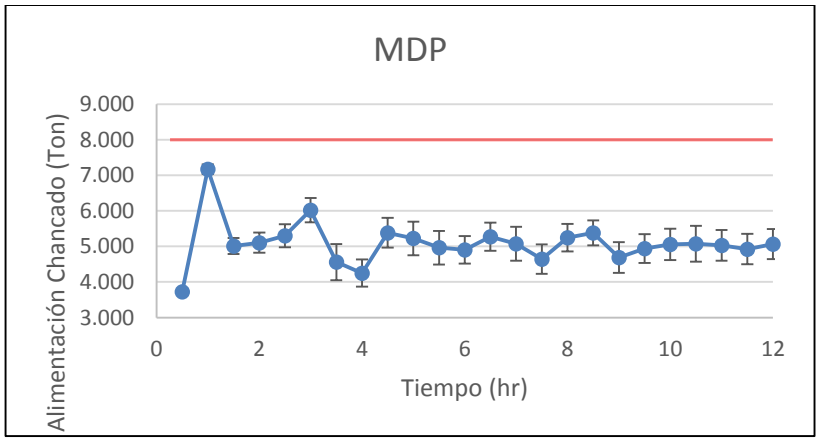


Figura 5-19. Alimentación a chancador, MDP, Escenario Base.

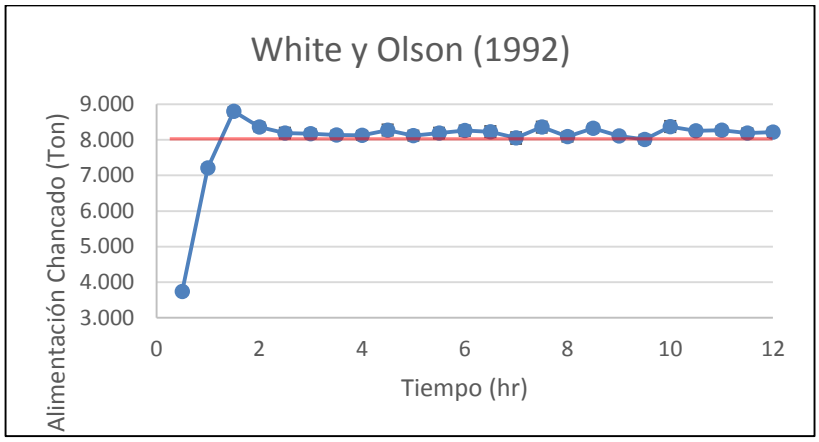


Figura 5-20. Alimentación a chancador, White y Olson (1992), escenario base.

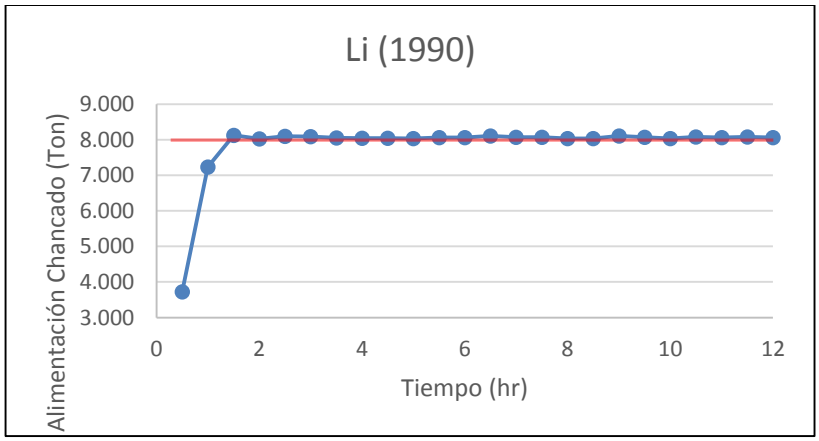


Figura 5-21. Alimentación a chancador, Li (1990), escenario Base.

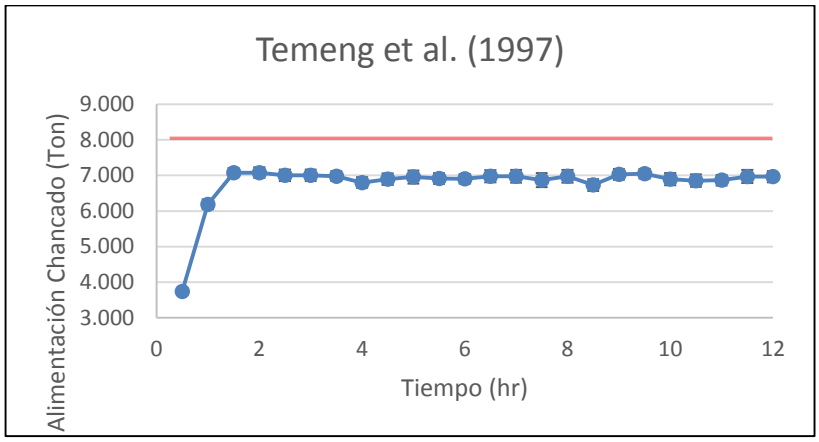


Figura 5-22. Alimentación a chancador, Temeng et al. (1997), escenario base.

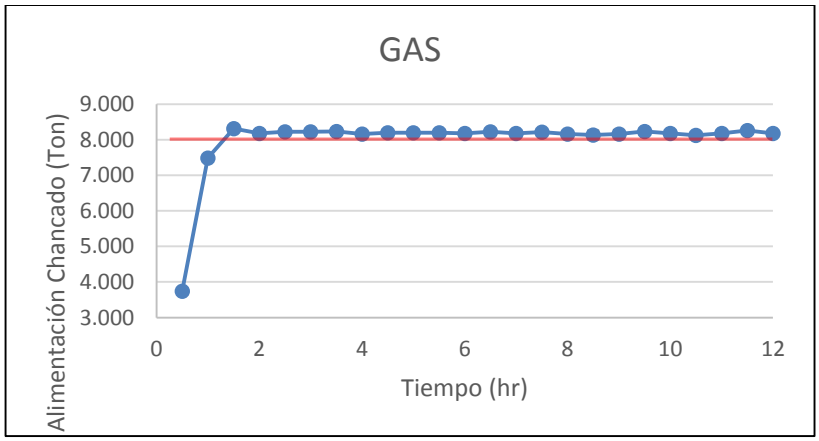


Figura 5-23. Alimentación a chancador, GAS, escenario base.

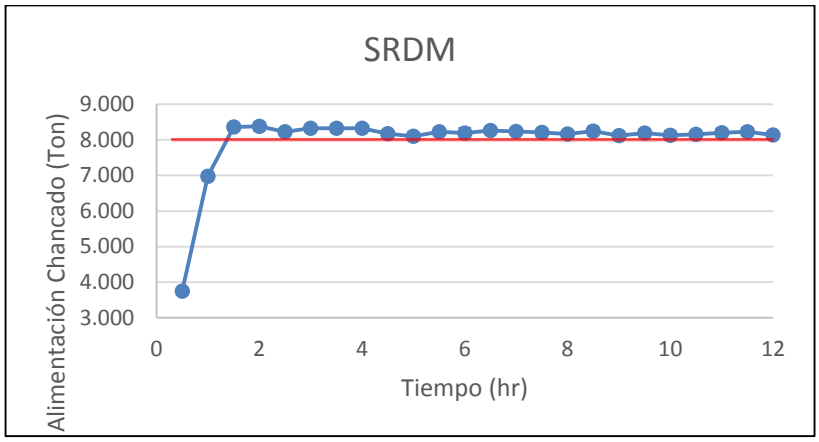


Figura 5-24. Alimentación a chancador, SRDM, escenario base.

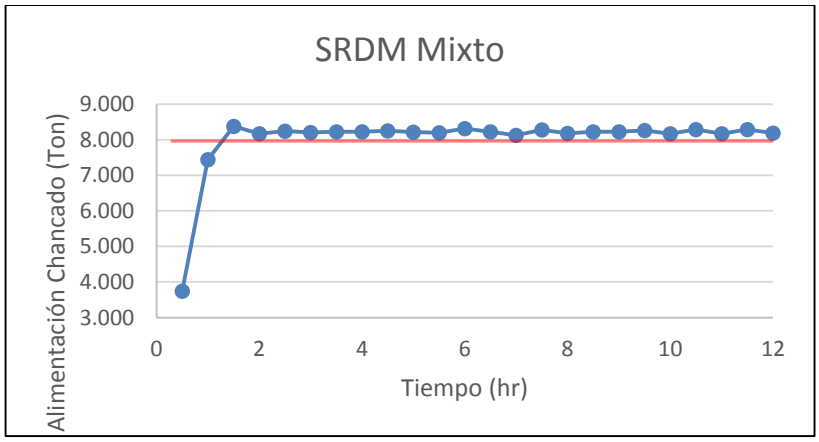


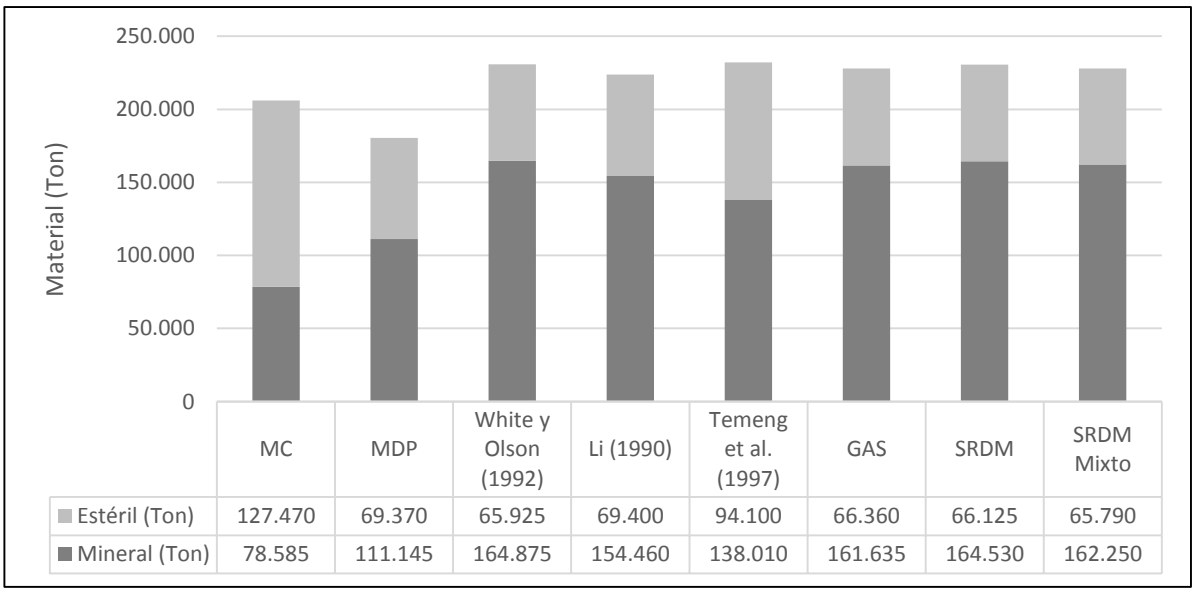
Figura 5-25. Alimentación a chancador, SRDM Mixto, escenario base.

5.2 Escenario 1

A diferencia del escenario anterior, y según se muestra en la Figura 5-26, en este caso la método de Temeng et al. (1997) es el que presenta el mayor acarreo de material total durante un turno de operación, con un valor un 0,6% mayor que el método de White y Olson (1992), que es el siguiente en términos de acarreo total. Es importante notar que en este escenario ninguno de los métodos alcanza el flujo de alimentación a chancado impuesto como objetivo, debido a la menor disponibilidad de camiones con que se trabaja (25).

Resulta difícil la existencia de un caso real que presente subdotación de camiones, ya que en general, en minería se trabaja con un número de camiones mayor al requerido. Esto, con el objetivo de asegurar una alimentación continua a chancador y aumentar la utilización de la planta concentradora de mineral.

Gráficos con mediciones de las medidas de desempeño cada 30 minutos de operación se presentan desde la Figura 5-27 a Figura 5-50.



	MC	MDP	White y Olson (1992)	Li (1990)	Temeng et al. (1997)	GAS	SRDM	SRDM Mixto
Estéril (Ton)	127.470	69.370	65.925	69.400	94.100	66.360	66.125	65.790
Mineral (Ton)	78.585	111.145	164.875	154.460	138.010	161.635	164.530	162.250

Figura 5-26. Movimiento de material total, escenario 1.

5.2.1 Métodos heurísticos

En este caso, de manera similar al escenario base, los métodos heurísticos no destacan en ninguna medida de desempeño. Respecto a la ley de alimentación a chancado, el método MDP presenta un valor medio de 0,849%, que resulta cercano al objetivo, pero que debido a la variabilidad del valor durante el turno presenta intervalos de confianza que oscilan entre 0,817% y 0,880%, siendo un rango mucho mayor al que presentan todos los demás métodos evaluados (ver Figura 5-28).

En cuanto a la razón estéril-mineral, ambos métodos presentan una sobre explotación de material estéril, que genera una razón estéril-mineral por encima del valor objetivo. Lo anterior, también impacta negativamente en la alimentación a chancador, ya que los camiones son destinados en mayor medida al transporte de estéril, perdiendo la posibilidad de cumplir con la meta de producción de mineral (ver Figura 5-35, Figura 5-36, Figura 5-43 y Figura 5-44).

5.2.2 Métodos que siguen flujos de material

En este segmento, destaca la metodología de White y Olson (1992), que presenta la menor desviación en términos de ley de mineral a chancado, razón estéril-mineral y alimentación a chancado. Si bien, el método de Li (1990) presenta una menor variabilidad en los resultados, el mejor valor esperado que proporciona White y Olson (1992) lo convierte en el método más confiable para utilizar en un caso con subdotación de camiones, siendo superado solamente SRDM Mixto, en cuanto a ley de mineral a chancado y razón estéril-mineral (ver Figura 5-29, Figura 5-30, Figura 5-37, Figura 5-38, Figura 5-45 y Figura 5-46).

En relación a la ley de mineral a chancado, ambos métodos recién mencionados entregan resultados de mejor calidad en cuanto a valor esperado y variabilidad, si se comparan con el método de Temeng et al. (1997), lo que se explica por el objetivo que persigue este último al minimizar el tiempo ocioso de los equipos, logrando una mejor utilización de los camiones, y entregando soluciones que presentan una alta

extracción de material estéril y razón estéril-mineral (ver Figura 5-39), debido al menor tiempo de viaje que requiere un ciclo de camión entre la pala de estéril y el botadero.

5.2.3 Métodos basados en simulación on-line

Entre estos métodos, destaca nuevamente el SRDM Mixto, que en términos de la ley de mineral a chancado presenta, además de la menor desviación del objetivo y variabilidad entre todos los métodos comparados, la más rápida convergencia a un estado estacionario, logrando la ley objetivo luego de transcurrida 1 hora de operación (ver Figura 5-34).

En cuanto a la razón estéril-mineral, los métodos GAS y SRDM Mixto presentan resultados similares, con un valor medio de 0,4 una vez alcanzado el estado estacionario, siendo en este caso los métodos que presentan los resultados con menor desviación respecto al valor objetivo, dado por la baja variabilidad de la razón estéril-mineral durante la operación (ver Figura 5-40 y Figura 5-42). El método SRDM presenta para esta variable un comportamiento distinto al de las otras metodologías, marcado por el aumento paulatino del valor de la razón estéril-mineral durante las primeras 4 horas de operación, con un valor medio de 0,42 una vez alcanzado el estado estacionario (ver Figura 5-41).

Respecto a la alimentación a chancado, entre los métodos basados en simulación, SRDM es el que presenta los valores más cercanos a la meta productiva, seguido por SRDM Mixto, con una alimentación a chancador promedio un 0,2% menor a la que presenta White y Olson (1992) (ver Figura 5-48 y Figura 5-50).

5.2.4 Análisis general

La Tabla 5-4 presenta un resumen con los resultados globales del sistema, donde se observan los mejores resultados para la metodología de White y Olson (1992) y SRDM, con valores similares en todas las medidas de desempeño, presentando el primero un valor levemente superior para la alimentación a chancador media. Esta

situación se da ya que al existir una baja dotación de camiones el cumplimiento de los flujos de material asignados a cada pala resulta más difícil de lograr, existiendo una mayor desviación relativa entre el material que se debe mover y el material movido para las palas que requieran de mayor flujo, generando un mayor despacho de camiones hacia las palas de extracción de mineral, que en este caso particular exigen mayor acarreo, y que a causa de la baja congestión en el sistema se traduce en una mayor extracción de mineral. De esta forma, la desviación con respecto a los objetivos de ley a chancado y razón estéril-mineral del método de White y Olson (1992) mejoran en este escenario si se comparan con los obtenidos en el escenario base.

Tabla 5-4. Resumen de resultados, escenario 1.

	Ley de Alimentación a Chancado		Razón Estéril-mineral		Alimentación a Chancado	
Metodología	Media (%)	Coeficiente de Variación	Media	Coeficiente de Variación	Media (Ton/hr)	Coeficiente de Variación
MC	0,857	0,002	1,63	0,10	3.273	0,05
MDP	0,849	0,013	0,86	0,34	4.629	0,14
White y Olson (1992)	0,851	0,003	0,42	0,29	6.868	0,11
Li (1990)	0,851	0,002	0,46	0,24	6.434	0,11
Temeng et al. (1997)	0,872	0,004	0,70	0,08	5.748	0,09
GAS	0,852	0,001	0,42	0,26	6.733	0,11
SRDM	0,851	0,002	0,42	0,28	6.853	0,12
SRDM Mixto	0,851	0,002	0,42	0,27	6.758	0,11

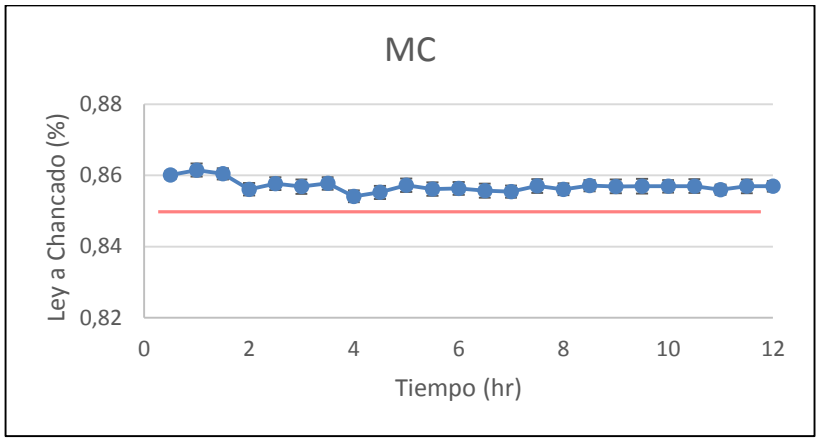


Figura 5-27. Ley de mineral a chancado, MC, escenario 1.

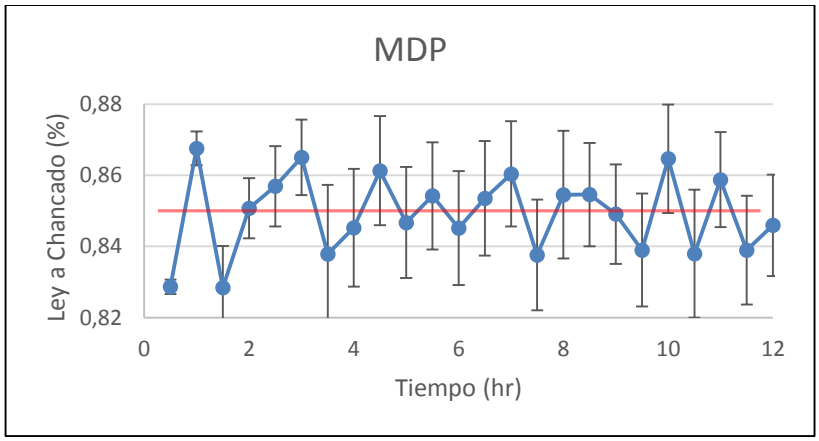


Figura 5-28. Ley de mineral a chancado, MDP, escenario 1.

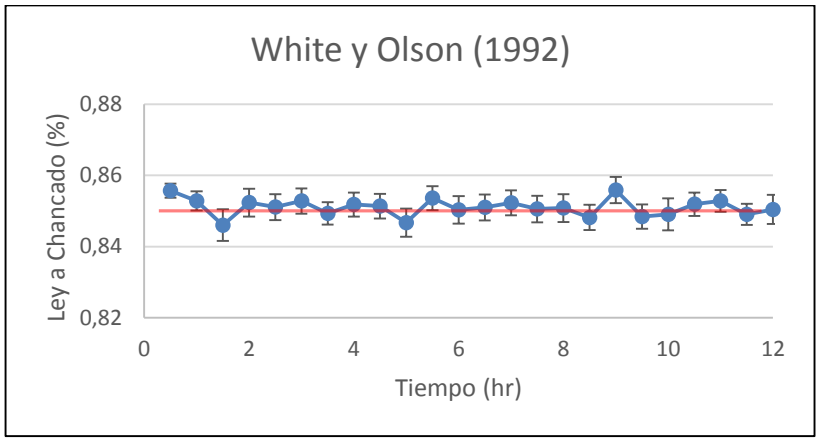


Figura 5-29. Ley de mineral a chancado, White y Olson (1992), escenario 1.

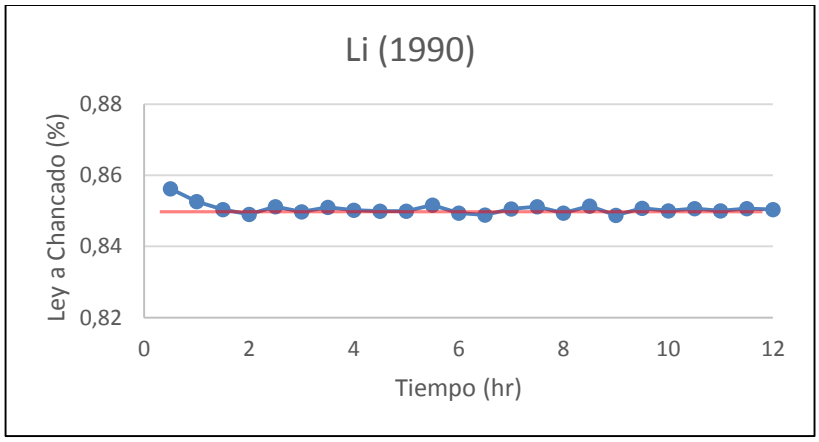


Figura 5-30. Ley de mineral a chancado, Li (1990), escenario 1.

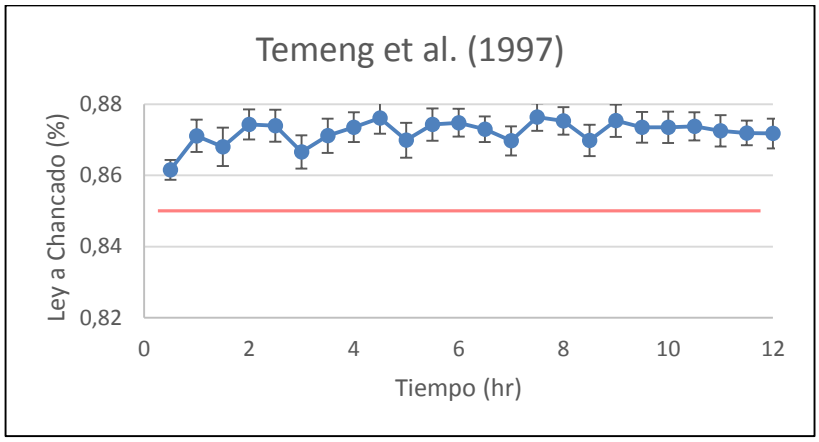


Figura 5-31. Ley de mineral a chancado, Temeng et al. (1998), escenario 1.

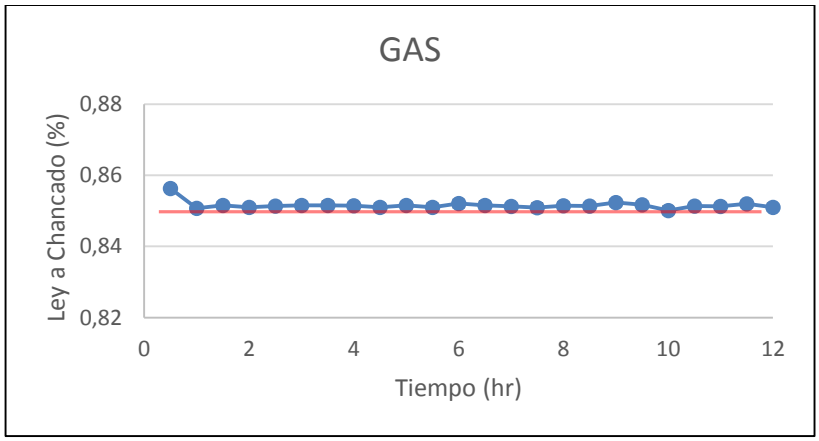


Figura 5-32. Ley de mineral a chancado, GAS, escenario 1.

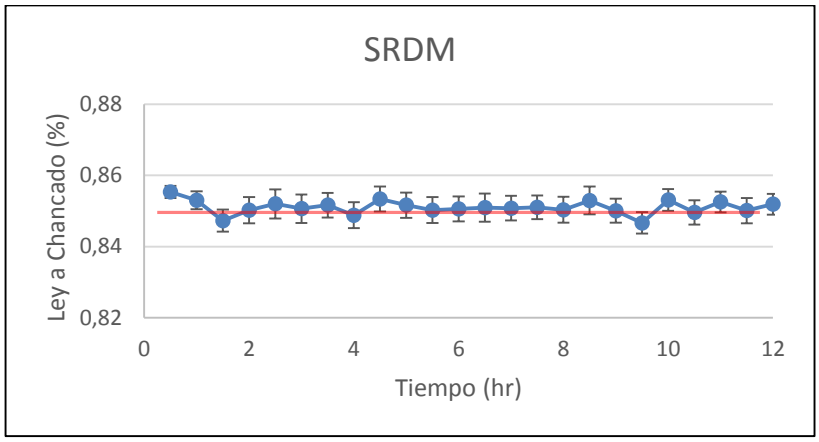


Figura 5-33. Ley de mineral a chancado, SRDM, escenario 1.

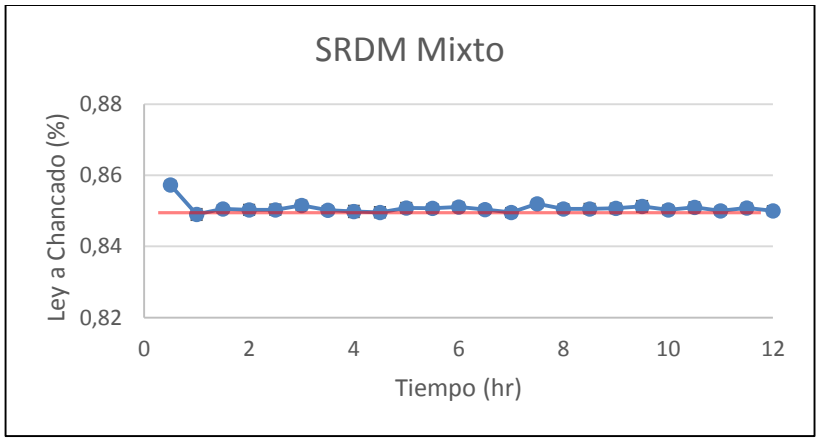


Figura 5-34. Ley de mineral a chancado, SRDM Mixto, escenario 1.

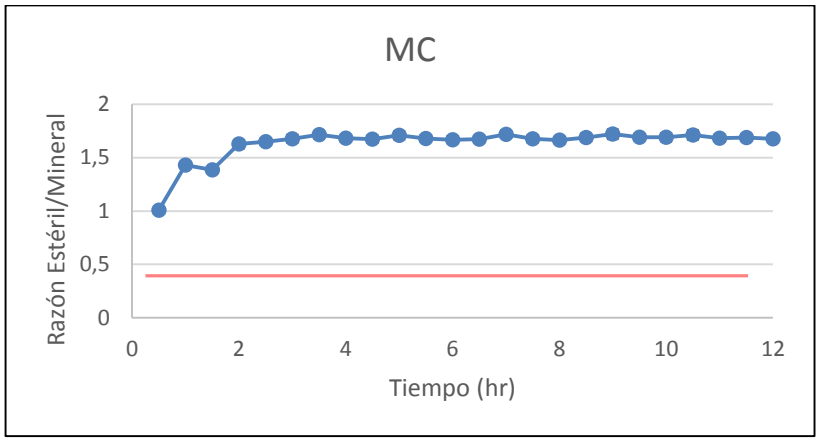


Figura 5-35. Razón estéril-mineral, MC, escenario 1.

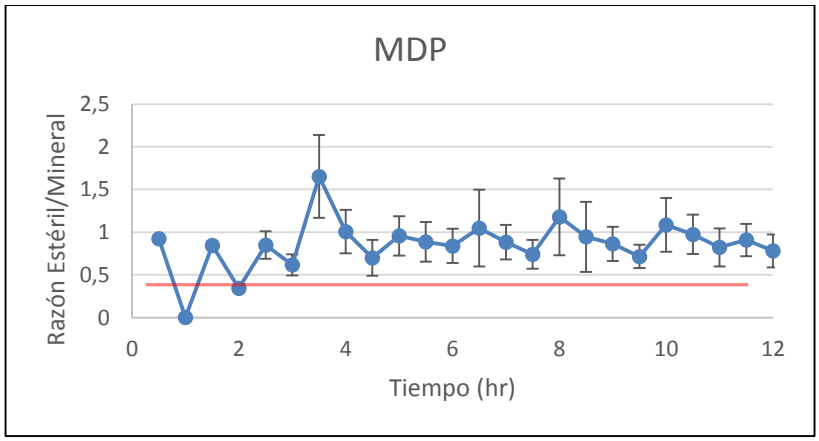


Figura 5-36. Razón estéril-mineral, MDP, escenario 1.

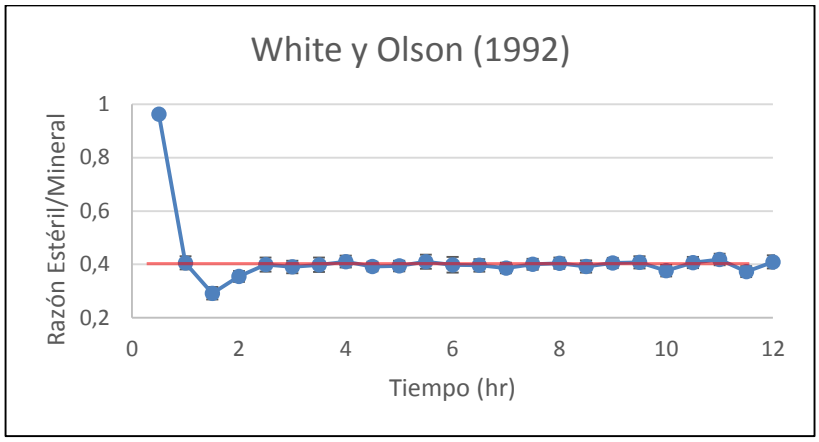


Figura 5-37. Razón estéril-mineral, White y Olson (1992), escenario 1.

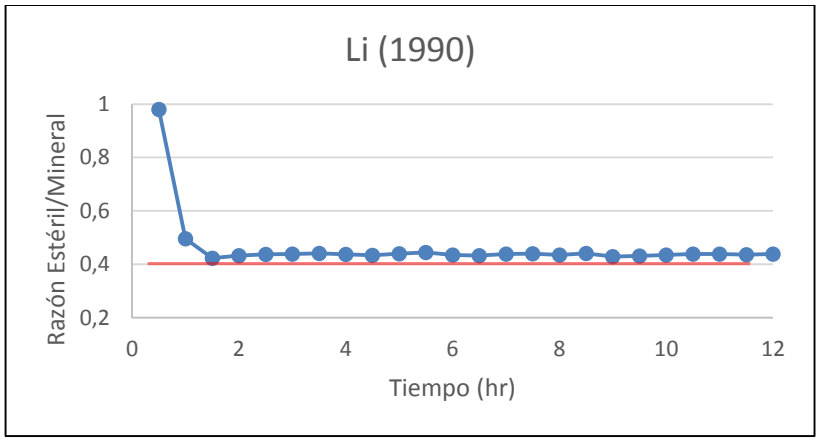


Figura 5-38. Razón estéril-mineral, Li (1990), escenario 1.

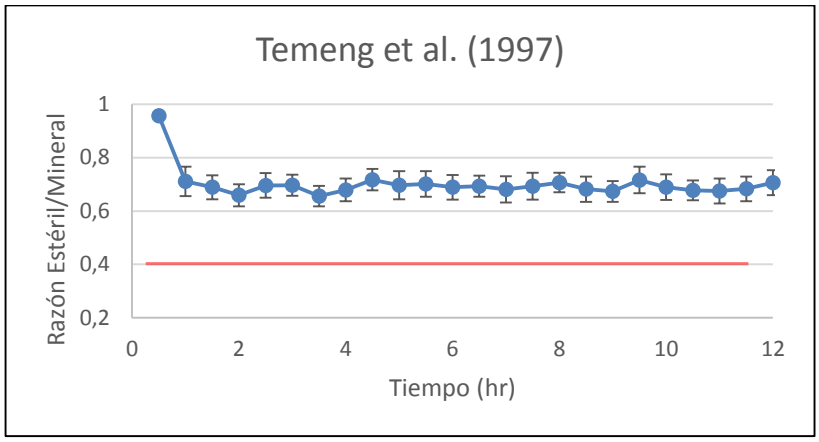


Figura 5-39. Razón estéril-mineral, Temeng et al. (1997), escenario 1.

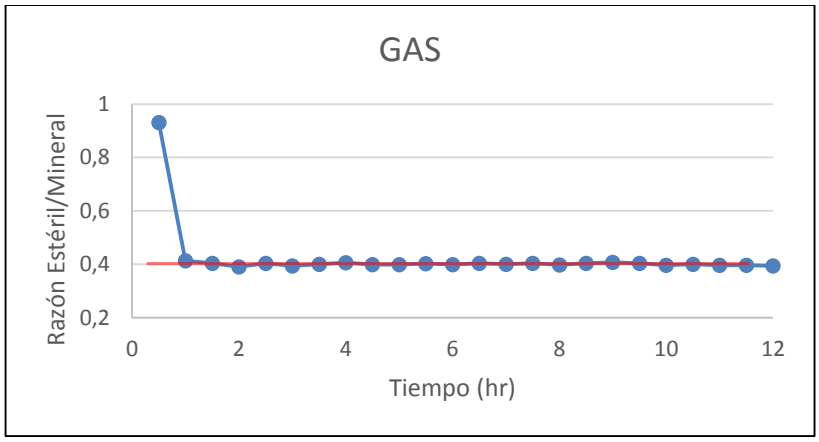


Figura 5-40. Razón estéril-mineral, GAS, escenario 1.

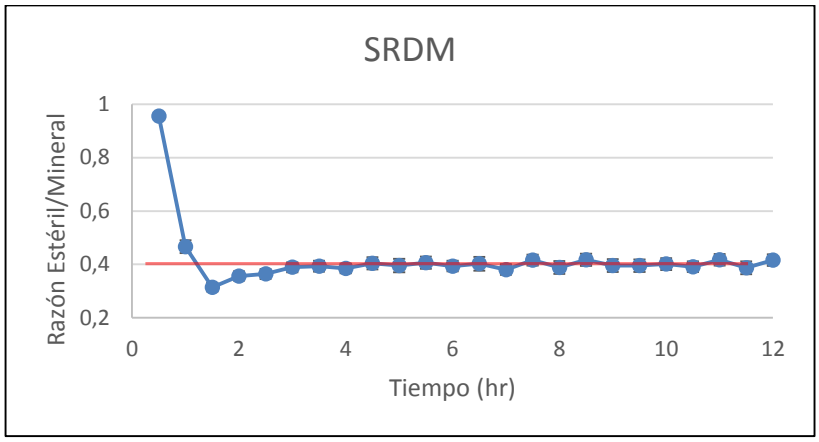


Figura 5-41. Razón estéril-mineral, SRDM, escenario 1.

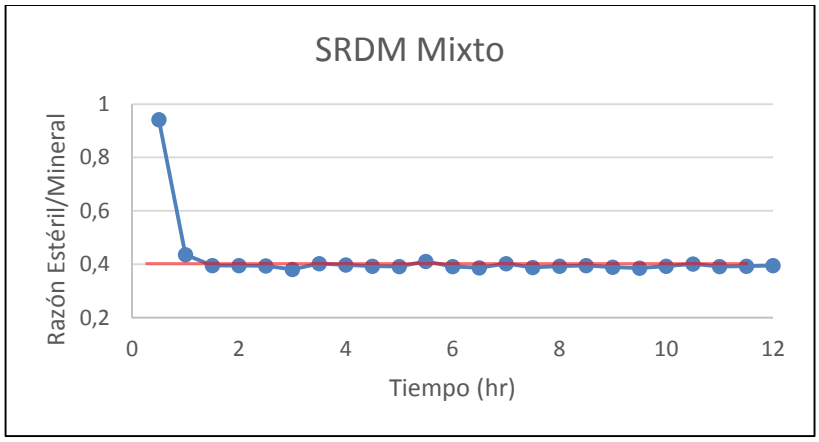


Figura 5-42. Razón estéril-mineral, SRDM Mixto, escenario 1

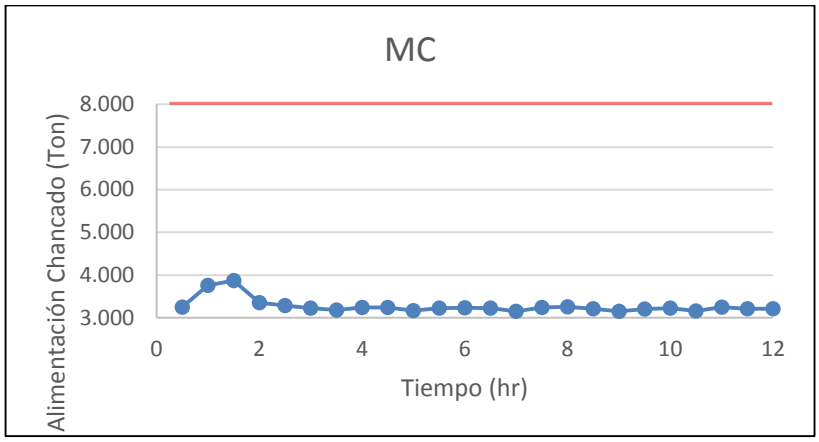


Figura 5-43. Alimentación a chancador, MC, escenario 1.

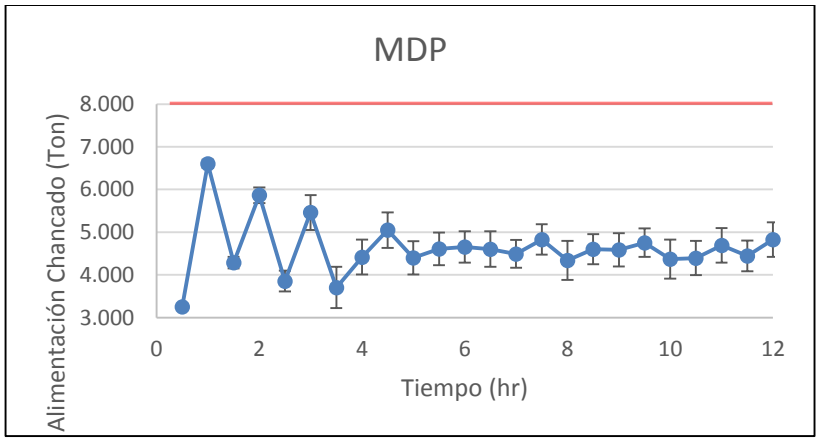


Figura 5-44. Alimentación a chancador, MDP, escenario 1.

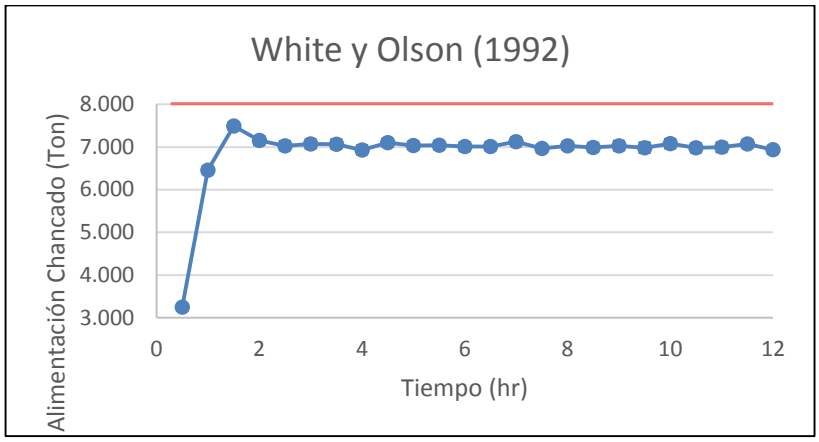


Figura 5-45. Alimentación a chancador, White y Olson (1992), escenario 1.

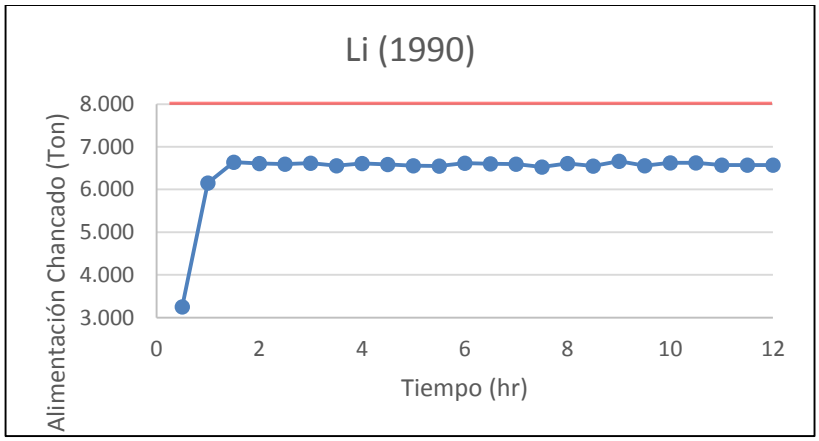


Figura 5-46. Alimentación a chancador, Li (1990), escenario 1.

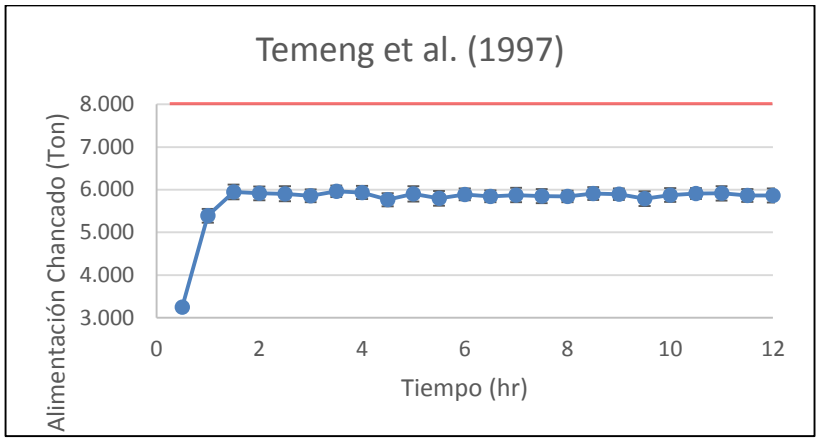


Figura 5-47. Alimentación a chancador, Temeng et al. (1997), escenario 1.

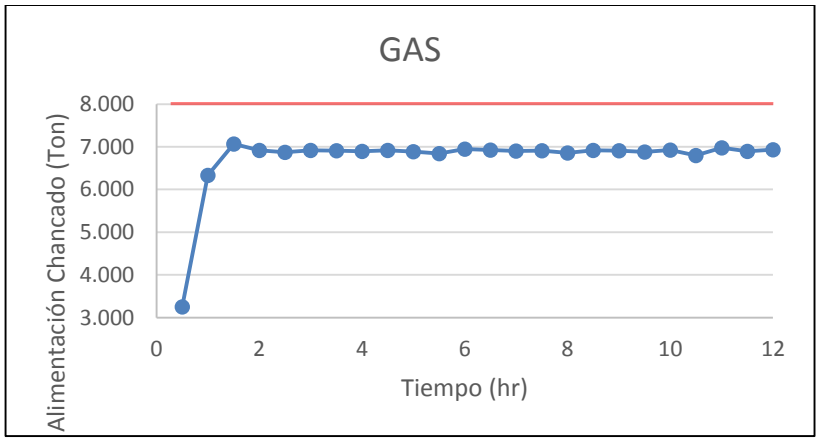


Figura 5-48. Alimentación a chancador, GAS, escenario 1.

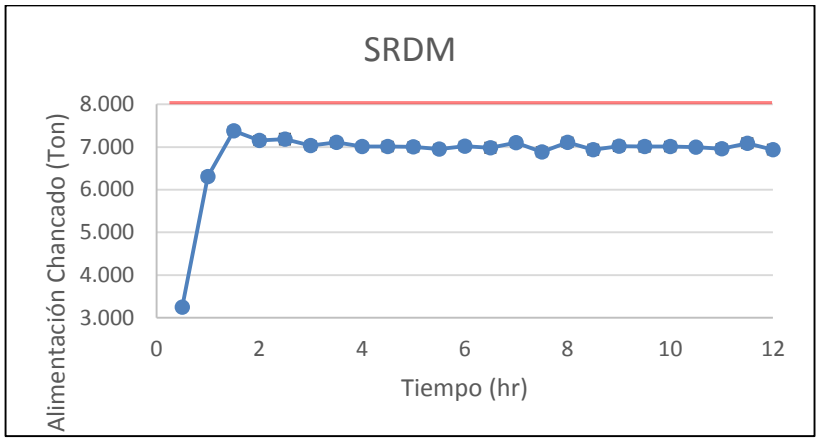


Figura 5-49. Alimentación a chancador, SRDM, escenario 1.

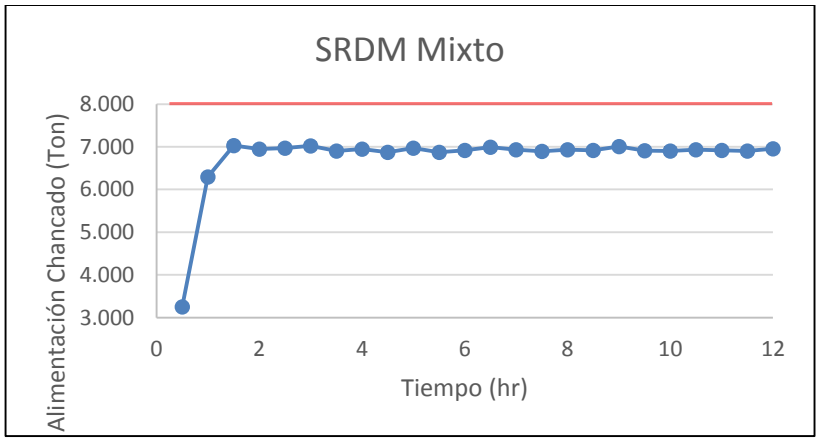


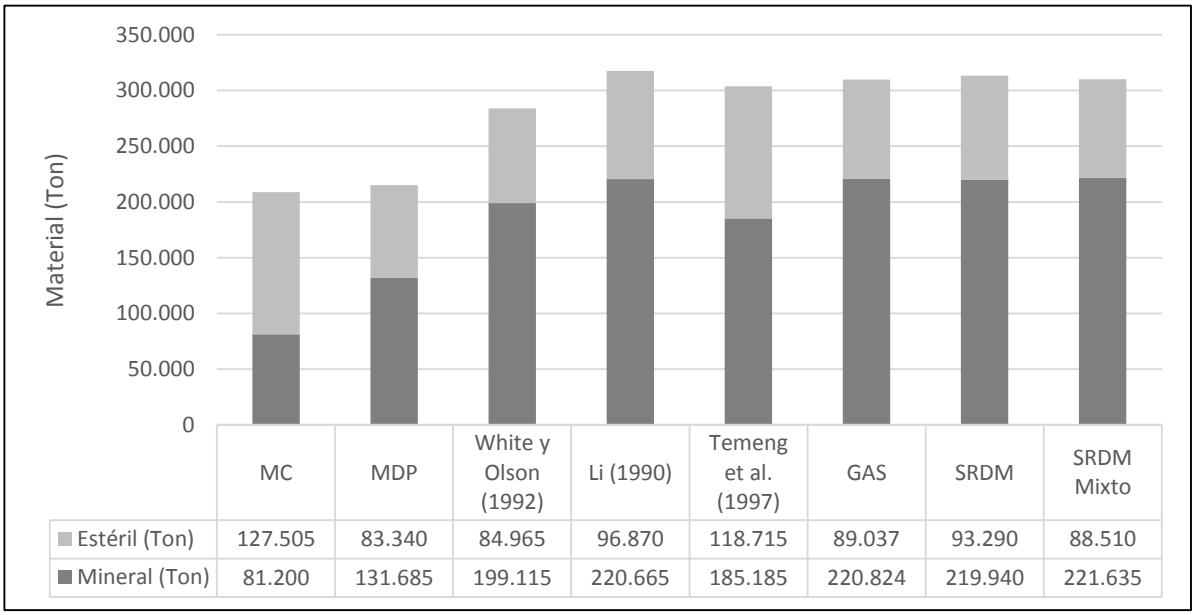
Figura 5-50. Alimentación a chancador, SRDM Mixto, escenario 1.

5.3 Escenario 2

En este escenario es el método de Li (1990) el que presenta el mayor movimiento de material total, según se muestra en la Figura 5-51, mientras que el método de White y Olson (1992) presenta el menor movimiento de material si no se considera a las heurísticas MC y MDP en el análisis, con una diferencia de un 12% con respecto a Li (1990).

Sin embargo, como se verá en detalle a continuación, ninguno de los métodos de despacho descritos en la literatura presenta resultados realmente ajustados a los objetivos, con desviaciones mayores a las que presentan los métodos basados en simulación on-line.

En la Figura 5-52 a Figura 5-75 se presentan los valores de las medidas de desempeño estudiadas cada 30 minutos de operación.



	MC	MDP	White y Olson (1992)	Li (1990)	Temeng et al. (1997)	GAS	SRDM	SRDM Mixto
Estéril (Ton)	127.505	83.340	84.965	96.870	118.715	89.037	93.290	88.510
Mineral (Ton)	81.200	131.685	199.115	220.665	185.185	220.824	219.940	221.635

Figura 5-51. Movimiento de material total, escenario 2.

5.3.1 Métodos heurísticos

Para este escenario, al igual que en los escenarios anteriores, los métodos heurísticos se caracterizan por presentar una razón estéril-mineral por encima del objetivo (ver Figura 5-60 y Figura 5-61), dado por el sobre acarreo de material estéril, que genera una pérdida de eficiencia en cuanto a la alimentación de mineral a chancado con un flujo de mineral alejado de la meta productiva a pesar de la mayor disponibilidad de equipos de transporte (ver Figura 5-68 y Figura 5-70).

Por otra parte, la ley de alimentación a chancado se mantiene por sobre el objetivo durante todo el turno en el caso de MC (ver Figura 5-52), mientras que logra una media para esta variable de 0,85% logrando exactamente el valor objetivo, pero con una variabilidad que genera intervalos de confianza que fluctúan entre 0,79% y 0,9% (ver Figura 5-53).

5.3.2 Métodos que siguen flujos de material

Entre los métodos que siguen flujos de material, es sólo el método presentado por Li (1990) el único que presenta un valor para la ley promedio a chancado cercana al valor objetivo, con una media de 0,851% e intervalos de confianza estrechos, con valores entre 0,849% y 0,852% luego de pasada 1 hora de operación (ver Figura 5-55). Por otra parte, los métodos de Temeng et al. (1997) y White y Olson (1992) presentan resultados con una media alejada del valor objetivo e intervalos de confianza que no lo incluyen en su dominio (ver Figura 5-62 y Figura 5-64).

En cuanto a la razón estéril-mineral, ninguno de estos métodos presenta valores cercanos a los objetivos, generando la sobre explotación de material estéril durante toda la operación. Temeng et al. (1997) es el método que presenta la mayor desviación con valores que superan una razón estéril-mineral de 0,6 durante toda la operación (ver Figura 5-64), mientras que los métodos de White y Olson (1992) y Li (1990) presentan una desviación menor con valores medios de 0,44 y 0,45, respectivamente, para la razón estéril-mineral (ver Figura 5-62 y Figura 5-63).

Respecto a la alimentación a planta, los métodos de White y Olson (1992) y Li (1990) superan la tasa de alimentación a chancado. Sin embargo, el método de Li (1990) presenta una alimentación media un 11% mayor a la alcanzada por White y Olson (1992) (ver Figura 5-70 y Figura 5-71). Por otra parte, el método de Temeng et al. (1997) es el único, sin considerar las heurísticas, que no alcanza la alimentación a chancado exigida (ver Figura 5-72).

5.3.3 Métodos basados en simulación on-line

En este caso, resulta fundamental indicar que los resultados presentados para el método GAS se construyen en base a sólo 47 de las 50 réplicas de la simulación, ya que las restantes presentan resultados de una calidad muy deficiente en términos de todas las medidas de desempeño evaluadas. Por esta razón, es que los resultados aquí presentados reflejan el comportamiento que podría alcanzar esta metodología si se contara con la potencia computacional suficiente para reducir el tiempo de cómputo a valores que permitan la ejecución del método en tiempo real, de otra forma este método resulta poco confiable y puede generar situaciones productivas no deseadas.

La baja confiabilidad que presenta el método GAS en este escenario, se debe a que contar con mayor número de camiones genera un mayor conjunto de soluciones factibles, por lo que se requiere de mayor exploración de soluciones para lograr un estadístico representativo de las medidas de desempeño. A esto se suma un aumento del horizonte de simulación, que crece a medida que aumenta la congestión en el sistema, ya que el camión solicitante tarda un mayor tiempo en cola para ser cargado, aumentando de esta forma el tiempo que toma la evaluación de una solución.

En promedio, al contar con 35 camiones en operación, se realizan 21 despachos en el horizonte de la simulación on-line del método GAS, lo que implica un número esperado de 822.188.574.856.198 soluciones en el espacio factible, teniendo este un tamaño 5.388 veces mayor que el considerado en el escenario base con 30 camiones. Con esto, para lograr evaluar una proporción equivalente del espacio factible al que se evalúa en el escenario base, es necesario medir el desempeño de 5.388.295

soluciones, para lo que se requeriría un tiempo de cómputo de aproximadamente 72 minutos para tomar una decisión de despacho[3]. Sin duda que esta situación deja fuera de competencia al método GAS para escenarios que requieran de la evaluación de gran número de soluciones, situación que se da en sistemas que presentan alto número de equipos.

No obstante, el método GAS entrega resultados ajustados a los objetivos operacionales, siendo la ley de alimentación a chancado la medida de desempeño que presenta la mayor desviación respecto al valor objetivo (ver Figura 5-57). Por otra parte, el método SRDM Mixto presenta los mejores resultados en términos de todas las medidas de desempeño evaluadas, con una ley de alimentación a chancado media igual a la ley objetivo y la mayor tasa de alimentación a chancado, siendo ésta última de un orden de magnitud comparable sólo a los demás métodos basados en simulación on-line y al método de Li (1990) (ver Figura 5-73, Figura 5-74 y Figura 5-75). En cuanto a la razón estéril-mineral, SRDM Mixto y GAS presentan la menor desviación con respecto al valor objetivo, mientras que SRDM una desviación mayor, con un valor medio de 0,41 luego de 2 horas de operación (ver Figura 5-65, Figura 5-66 y Figura 5-67).

5.3.4 Análisis general

La Tabla 5-5 presenta un resumen de los resultados del escenario, donde destaca el método SRDM Mixto, debido a que presenta la menor desviación con respecto a los objetivos operacionales de ley de alimentación a chancado y razón estéril mineral, sino que adicionalmente genera la mayor alimentación a chancado.

En segundo lugar, en términos de calidad de los resultados, se ubica el método GAS, con bajas desviaciones respecto a los objetivos operacionales y una alimentación a chancado similar a la de SRDM Mixto. Sin embargo, debido al alto esfuerzo

[3] La estimación para el tiempo de cómputo se realizó en base al tiempo de evaluación de 1.000 soluciones mediante el método GAS, utilizando un computador con procesador Intel ® Core™ i7-2600 de 3,4 GHz y 8 Gb de memoria RAM instalada.

computacional que requiere una aplicación exitosa del método en este escenario, no es posible su implementación, ya que para asegurar buenos resultados se requiere de la evaluación de un amplio número de soluciones que no resultan factibles de calcular en una aplicación en tiempo real.

En este escenario, el método de White y Olson (1992) y Temeng et al. (1997) muestran peores resultados en relación a los escenarios antes presentados, situación que se da a causa de la peor calidad de la estimación, principalmente, de tiempos de espera de los camiones y palas al tomar una decisión de despacho a través de los métodos mencionados.

Tabla 5-5. Resumen de resultados, escenario 2.

	Ley de Alimentación a Chancado		Razón Estéril-mineral		Alimentación a Chancado	
Metodología	Media (%)	Coeficiente de Variación	Media	Coeficiente de Variación	Media (Ton/hr)	Coeficiente de Variación
MC	0,858	0,002	1,61	0,15	3.382	0,15
MDP	0,850	0,018	0,81	0,23	5.485	0,12
White y Olson (1992)	0,858	0,003	0,44	0,20	8.294	0,12
Li (1990)	0,851	0,001	0,45	0,19	9.192	0,12
Temeng et al. (1997)	0,865	0,003	0,65	0,06	7.714	0,11
GAS	0,852	0,001	0,41	0,21	9.200	0,12
SRDM	0,850	0,002	0,44	0,21	9.131	0,13
SRDM Mixto	0,850	0,001	0,41	0,22	9.233	0,12

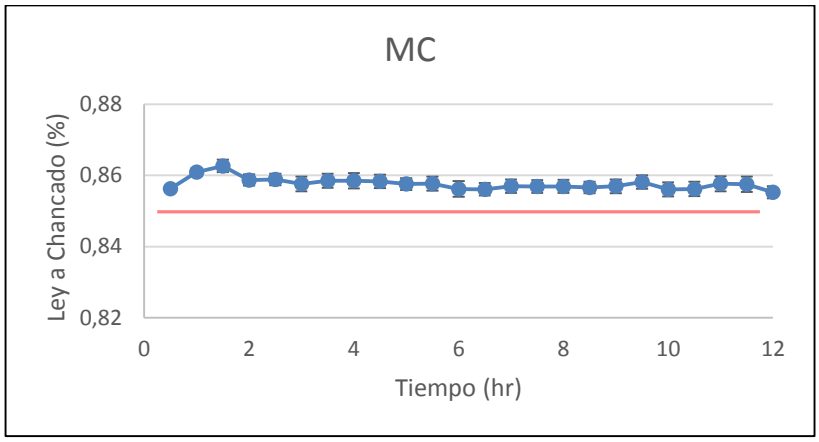


Figura 5-52. Ley de mineral a chancado, MC, escenario 2.

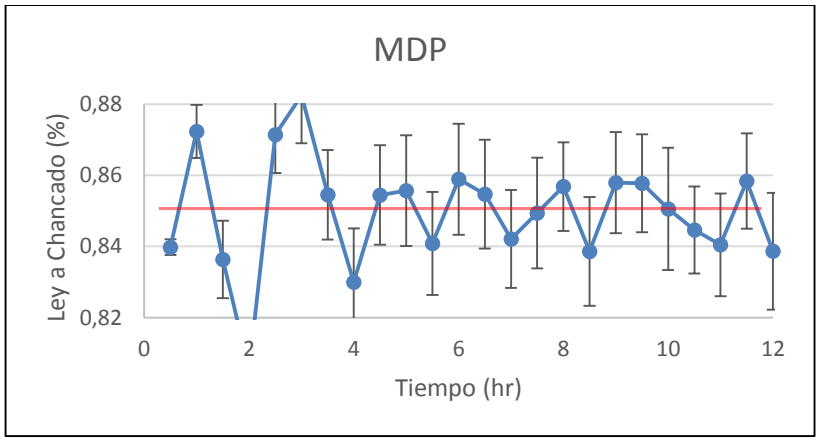


Figura 5-53. Ley de mineral a chancado, MDP, escenario 2.

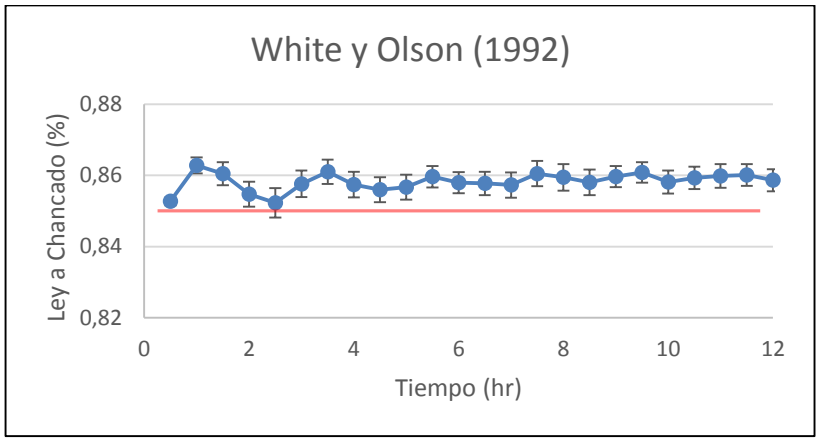


Figura 5-54. Ley de mineral a chancado, White y Olson (1992), escenario 2.

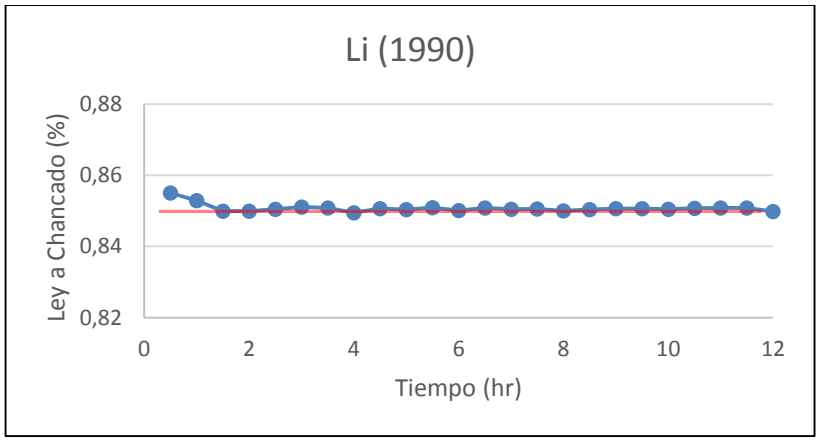


Figura 5-55. Ley de mineral a chancado, Li (1990), escenario 2.

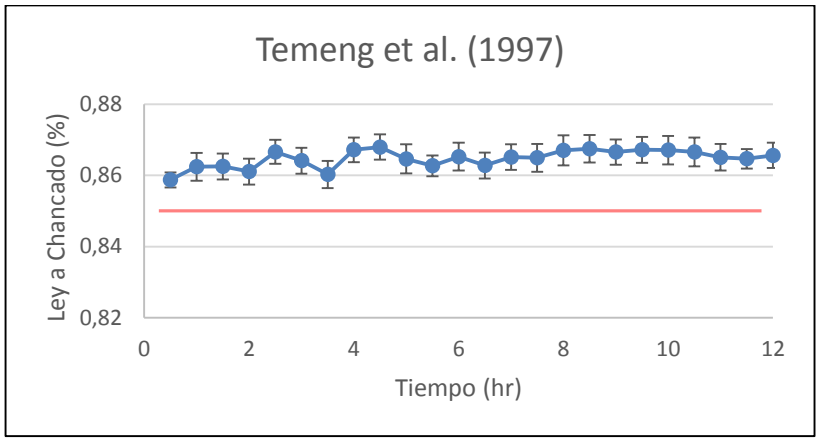


Figura 5-56. Ley de mineral a chancado, Temeng et al. (1997), escenario 2.

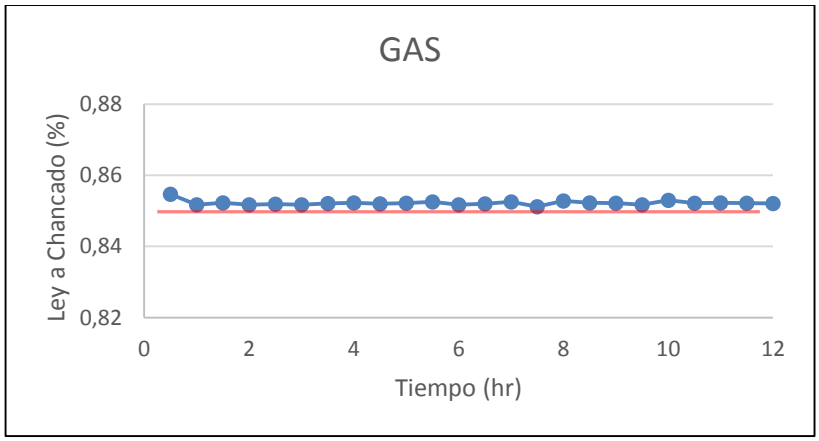


Figura 5-57. Ley de mineral a chancado, GAS, escenario 2.

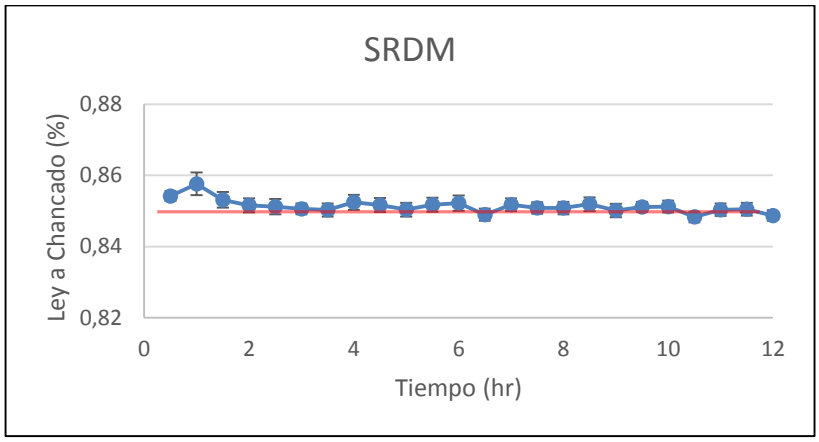


Figura 5-58. Ley de mineral a chancado, SRDM, escenario 2.

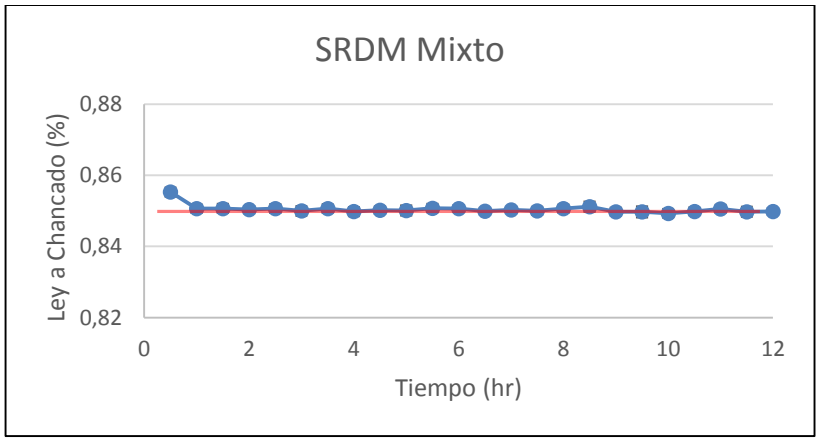


Figura 5-59. Ley de mineral a chancado, SRDM Mixto, escenario 2.

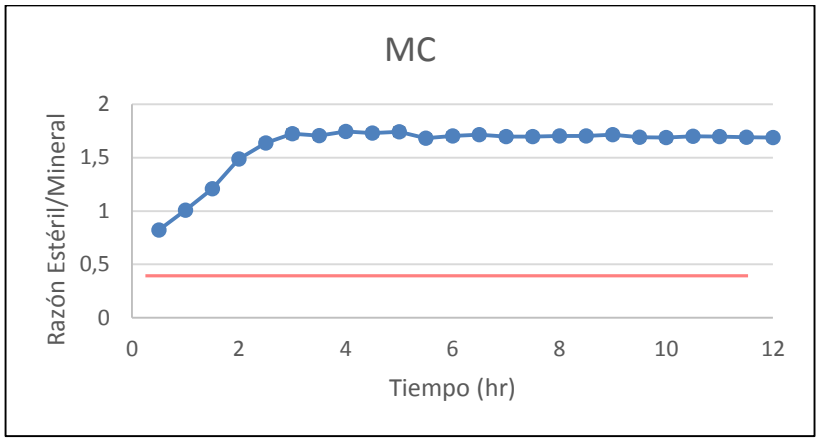


Figura 5-60. Razón estéril-mineral, MC, escenario 2.

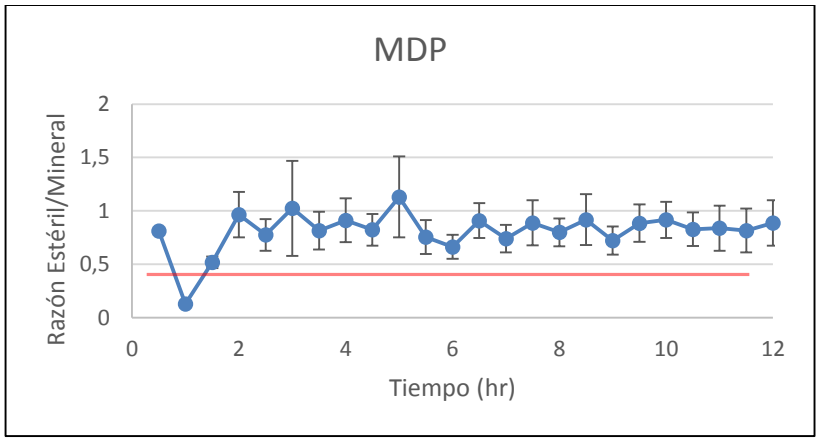


Figura 5-61. Razón estéril-mineral, MDP, escenario 2.

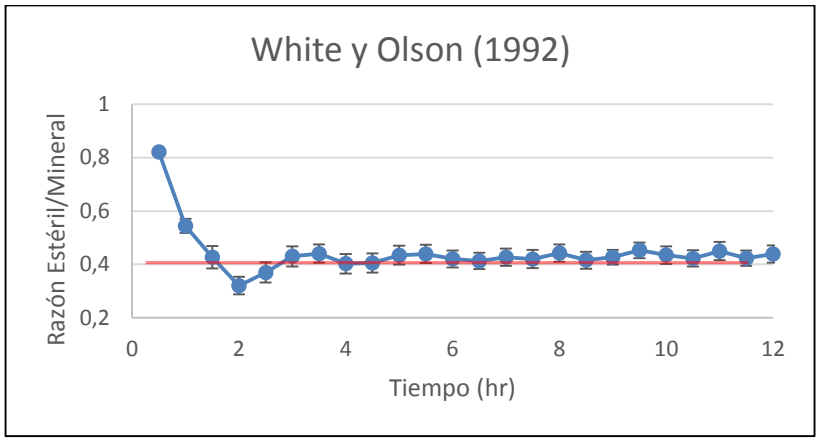


Figura 5-62. Razón estéril-mineral, White y Olson (1992), escenario 2.

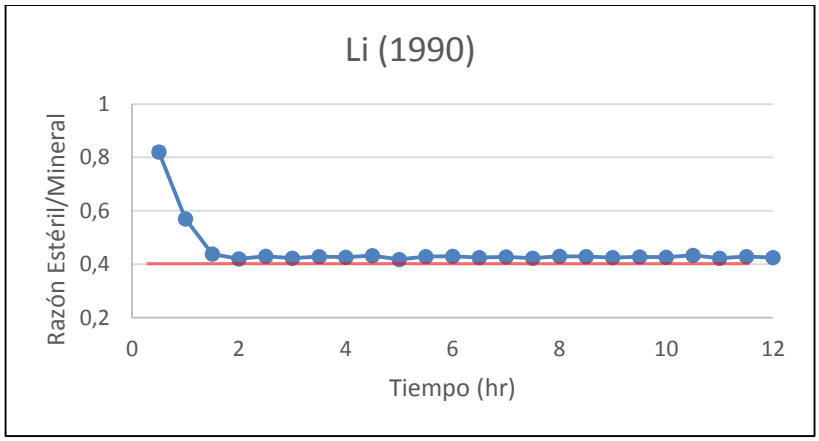


Figura 5-63. Razón estéril-mineral, Li (1990), escenario 2.

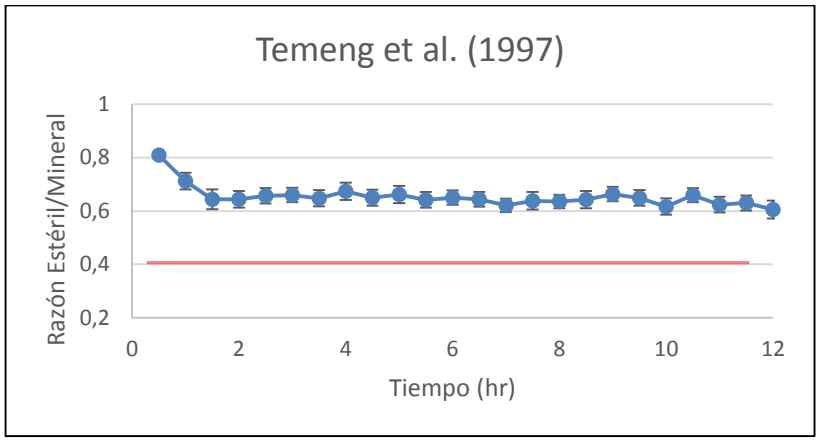


Figura 5-64. Razón estéril-mineral, Temeng et al. (1997), escenario 2.

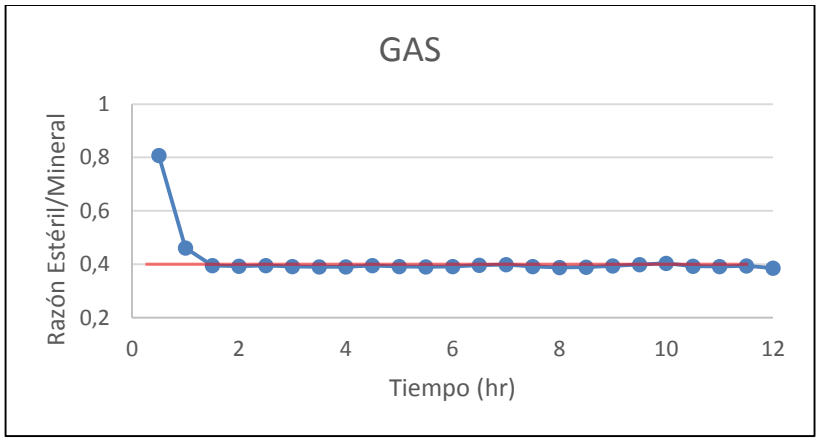


Figura 5-65. Razón estéril-mineral, GAS, escenario 2.

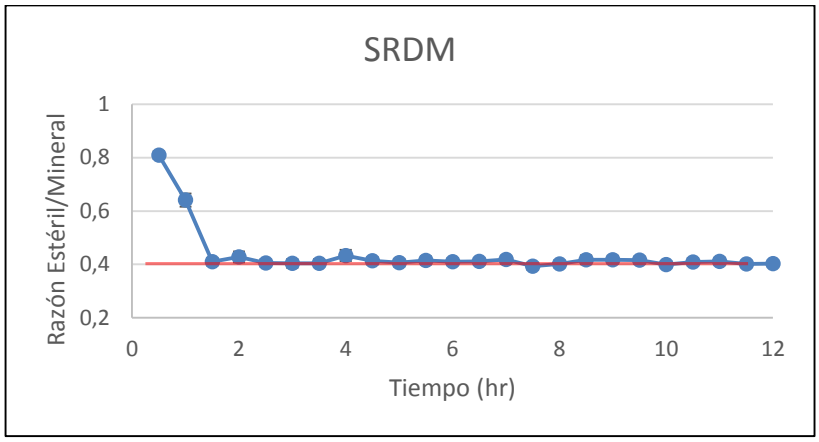


Figura 5-66. Razón estéril-mineral, SRDM, escenario 2.

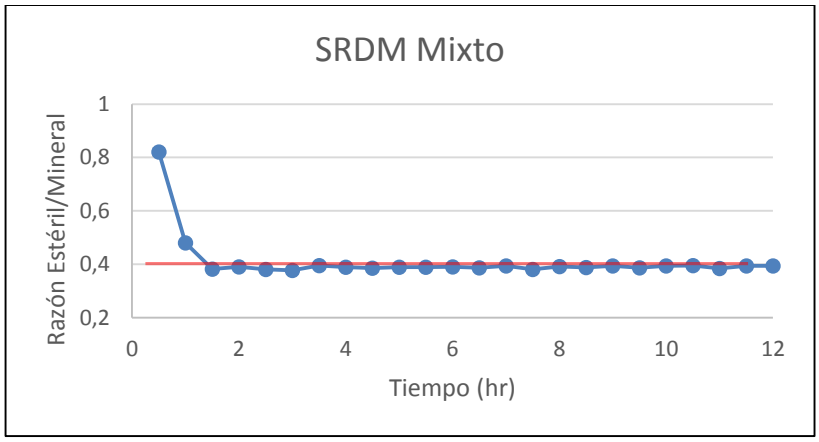


Figura 5-67. Razón estéril-mineral, SRDM Mixto, escenario 2.

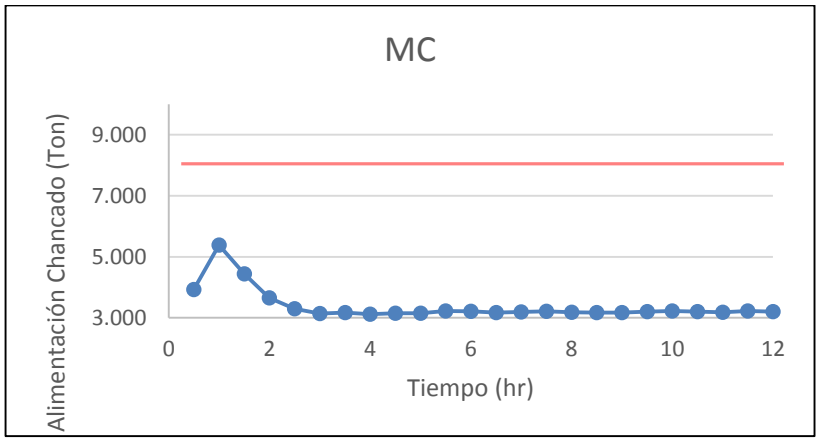


Figura 5-68. Alimentación a chancador, MC, escenario 2.

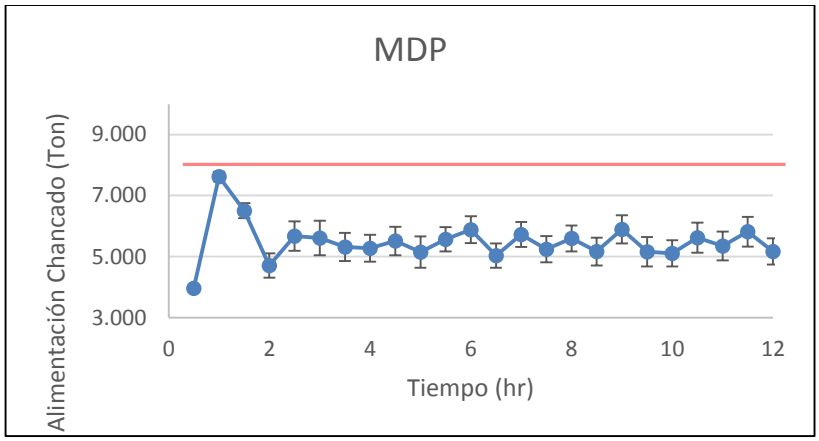


Figura 5-69. Alimentación a chancador, MDP, escenario 2.

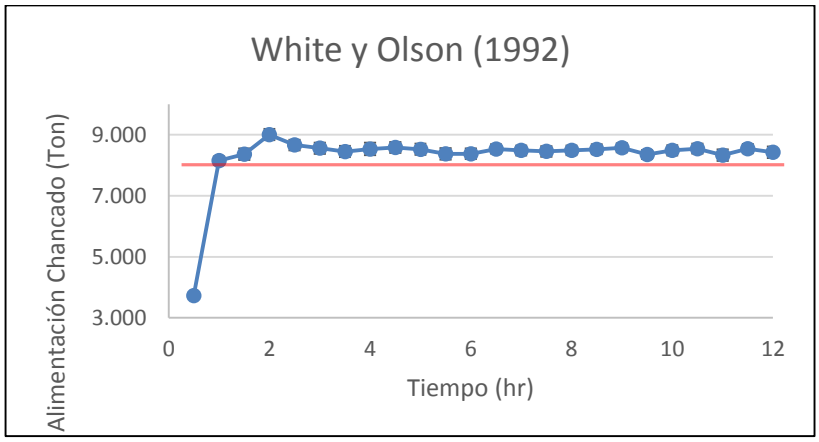


Figura 5-70. Alimentación a chancador, White y Olson (1992), escenario 2.

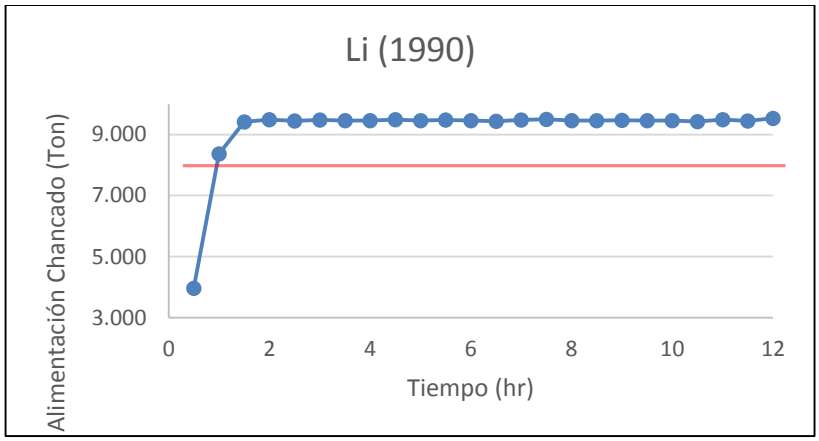


Figura 5-71. Alimentación a chancador, Li (1990), escenario 2.

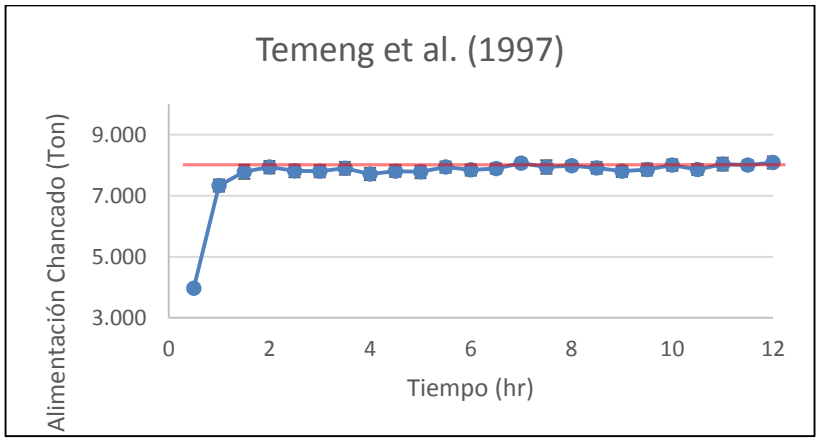


Figura 5-72. Alimentación a chancador, Temeng et al. (1997), escenario 2.

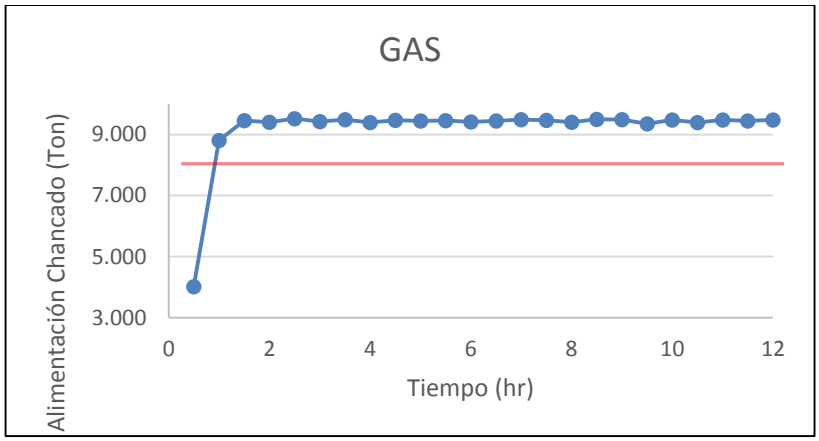


Figura 5-73. Alimentación a chancador, GAS, escenario 2.

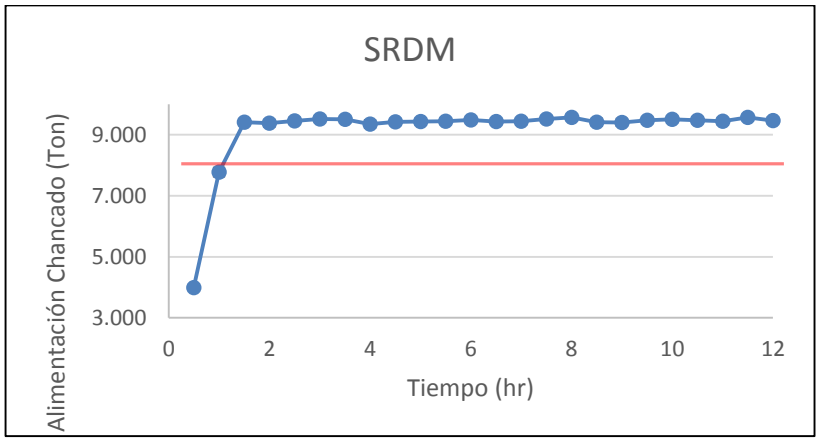


Figura 5-74. Alimentación a chancador, SRDM, escenario 2.

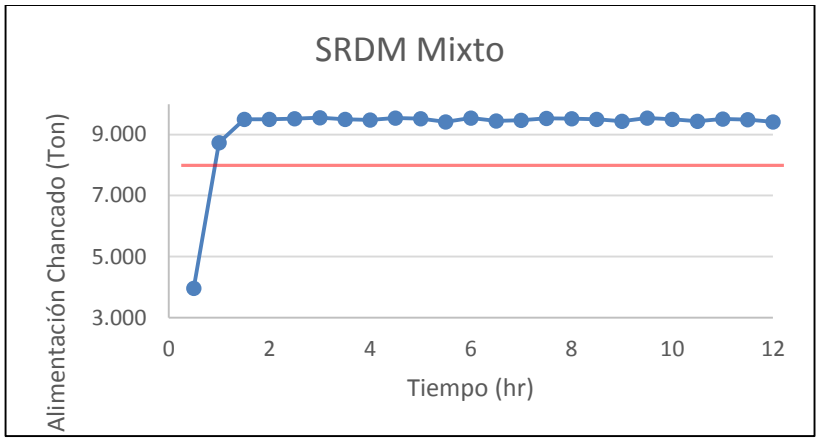
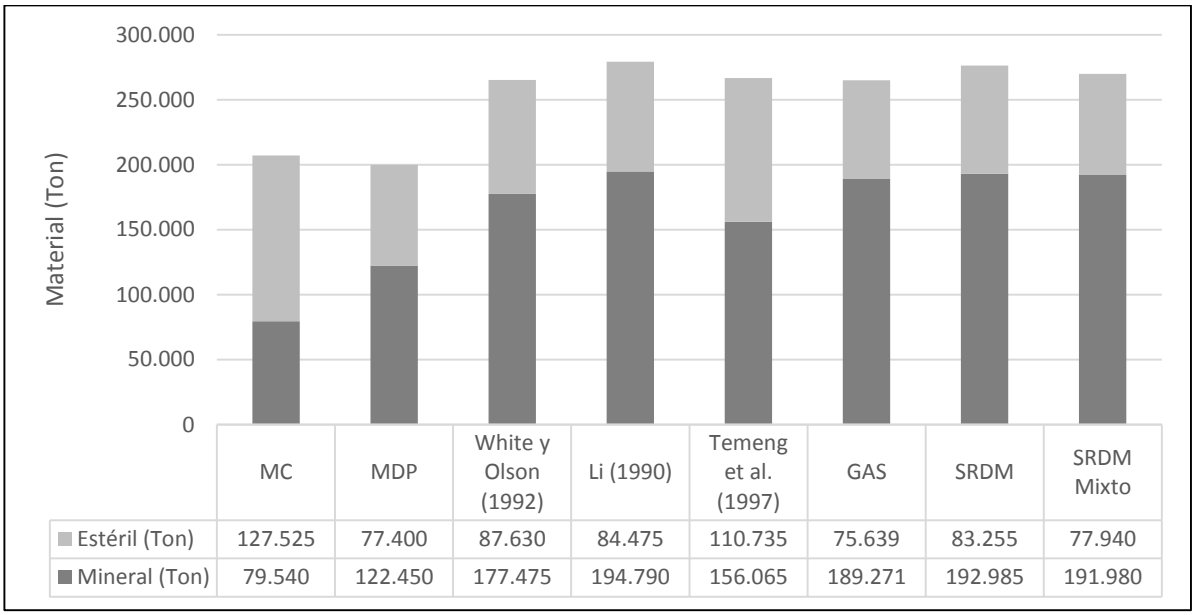


Figura 5-75. Alimentación a chancador, SRDM Mixto, escenario 2.

5.4 Escenario 3

En este escenario, que se caracteriza por presentar una disponibilidad de leyes en las palas que dificulta la obtención de la ley objetivo a chancado de 0,85%, el modelo de asignación de flujos de material, expuesto en la sección 3.1.4, determina que no es posible cumplir con la misma tasa de alimentación a chancado impuesta en los escenarios anteriores, estimando una tasa de 6.925 toneladas de mineral cada 30 minutos para alimentar al chancador. En este punto, es importante mencionar que el modelo de asignación de flujos utilizado, propuesto por Ta et al. (2010), considera el movimiento de los camiones bajo un esquema de circuito fijo, lo que no permite su redistribución dentro de la mina en circunstancias en que se vuelve útil. De esta forma, y como se muestra a continuación, por medio de algunas de las metodologías de despacho evaluadas si resulta posible lograr la meta de alimentación a chancado original, de 8.000 toneladas de mineral cada 30 minutos, debido a la asignación eficiente de los camiones en cada despacho.

Como se aprecia en la Figura 5-76, en este escenario, el método que presenta el mayor acarreo de mineral corresponde al propuesto por Li (1990), seguido por SRDM y SRDM Mixto, donde éste último alcanza un acarreo total un 3% por debajo del método de Li (1990). Sin embargo, en términos de desviación con respecto a los objetivos operacionales, nuevamente destacan las técnicas basadas en simulación on-line, presentando la menor desviación y alcanzando una alimentación a chancado sobre las 8.000 toneladas de mineral cada 30 minutos luego de 1,5 horas de operación.



	MC	MDP	White y Olson (1992)	Li (1990)	Temeng et al. (1997)	GAS	SRDM	SRDM Mixto
Estéril (Ton)	127.525	77.400	87.630	84.475	110.735	75.639	83.255	77.940
Mineral (Ton)	79.540	122.450	177.475	194.790	156.065	189.271	192.985	191.980

Figura 5-76. Movimiento de material total, escenario 3.

5.4.1 Métodos heurísticos

En este caso, la heurística MC no varía con respecto a los resultados entregados en el escenario base, salvo en el caso de la ley de alimentación a chancado (ver Figura 5-77). Esto debido a que el método no persigue ningún objetivo en cuanto a las medidas de desempeño, y la toma de decisiones de despacho se basa únicamente en la pala que presenta un menor tiempo de espera para el camión que solicita despacho. La diferencia en la ley de alimentación a chancado con respecto al escenario base, se debe a las distintas disponibilidades de leyes en las palas, que aumenta según la proporción del mineral transportado a chancador desde la pala 2.

Respecto al método MDP, a diferencia de los resultados en los escenario presentados en los escenario anteriores, en este caso el método no cumple con el objetivo de ley de alimentación a chancado (ver Figura 5-78), manteniendo el valor objetivo fuera de los rangos del intervalo de confianza durante todo el turno de operación. En cuanto a la razón estéril-mineral, al igual que en los escenarios anteriores, el método

presenta un valor por sobre el objetivo, resultando en el sobre acarreo de material estéril, que genera una baja en el transporte de mineral a chancado (ver Figura 5-86 y Figura 5-94).

5.4.2 Métodos que siguen flujos de material

Entre los métodos que siguen flujos de material, destacan los resultados entregados por el método de Li (1990), que pese a presentar una ley media de alimentación a chancado mayor a 0,86% (ver Figura 5-80), logra la menor desviación en cuanto a razón estéril-mineral en esta categoría, y adicionalmente es el único de este grupo que supera las 8.000 toneladas de mineral a chancado cada 30 minutos de operación (ver Figura 5-88 y Figura 5-96).

Por otra parte, y a diferencia de lo ocurrido en los escenarios evaluados anteriormente, el método de White y Olson (1992) presenta mejores resultados en cuanto a la ley de mineral a chancado en este segmento (ver Figura 5-79), pero con una desviación mayor para la razón estéril-mineral, que provoca la sobre utilización de los camiones para el acarreo de material estéril, bajando la tasa de alimentación a chancando a niveles inferiores a las 8.000 toneladas cada 30 minutos (ver Figura 5-87 y Figura 5-95).

En cuanto al método de Temeng et al. (1997), este presenta la mayor desviación respecto a los objetivos operacionales, con una razón estéril-mineral por sobre 0,7 en la mayor parte del turno, generando una baja en la alimentación a planta debido a la sobre excavación de material estéril (ver Figura 5-89 y Figura 5-97). Respecto a la ley de mineral, este método mantiene una ley de alimentación a chancado alrededor de 0,88% durante todo el turno de operación, siendo comparable al desempeño de los métodos heurísticos en cuanto a esta variable (ver Figura 5-81).

5.4.3 Métodos basados en simulación on-line

En este escenario, de manera similar a lo que ocurre en el escenario 2, el método GAS presenta resultados satisfactorios en sólo 36 de las 50 réplicas de la simulación

ejecutadas, debido a que el método requiere de mayor exploración para la correcta toma de decisiones en este caso. La necesidad de explorar un mayor conjunto de soluciones surge a partir de la mayor variabilidad que presentan las medidas de desempeño, especialmente la ley de mineral a chancado, generando un estadístico poco significativo al evaluar un conjunto reducido de soluciones para evaluar el desempeño futuro entre distintas asignaciones de despacho. De esta forma, deja de ser factible la implementación del método GAS en un escenario como éste, a causa del mayor tiempo de cómputo que requeriría la toma de decisiones para asegurar resultados confiables.

Sin embargo, si se dejan fuera del análisis los valores de las réplicas deficientes, el método presenta la más baja desviación en términos de la razón estéril-mineral, seguido por el método SRDM Mixto (ver Figura 5-90 y Figura 5-92), donde destaca el método SRDM Mixto por alcanzar un valor estable luego de 1,5 horas de operación.

Por otra parte, todos los métodos basados en simulación on-line presentan una alimentación a chancador mayor a las 8.000 toneladas cada 30 minutos, superando la meta productiva impuesta por el modelo de asignación de flujos y logrando cumplir con la alimentación a chancador pese a la mayor dificultad impuesta por la disponibilidad de leyes en las palas (ver Figura 5-98 y Figura 5-100).

Adicionalmente, los métodos basados en simulación on-line presentan leyes de mineral chancado más estables; menos variables, con intervalos de confianza más estrechos; y con una menor desviación respecto a los objetivos operacionales durante todo el turno de operación, superando en esta medida de desempeño a todos los demás métodos evaluados (ver Figura 5-82, Figura 5-83 y Figura 5-84).

5.4.4 Análisis general

La Tabla 5-6 muestra un resumen de los resultados obtenidos para este escenario, donde se observa que ninguna metodología logra una ley de mineral a chancado con

una desviación menor a 0,04% con respecto al valor objetivo, siendo el método SRDM Mixto el con mejores resultados en esta medida de desempeño. Por otra parte, a pesar de que el método de Li (1990) es el que presenta la mayor alimentación a chancador media, su desviación respecto a la ley de mineral a chancado y razón estéril-mineral resulta mayor a la obtenida por cualquiera de los métodos basados en simulación on-line.

Este análisis de resultados sugiere la inclusión de técnicas que permitan al método GAS estimación de la cantidad de soluciones aleatorias a evaluar para cada alternativa de despacho disponible para el camión solicitante, de manera de tomar las decisiones de despacho con un determinado nivel de confianza. No obstante, la alta variabilidad que presentan las soluciones en escenarios como el recién evaluado, podría generar tiempos de cómputo demasiado altos que no permitan una implementación real del método.

Tabla 5-6. Resumen de resultados, escenario 3.

	Ley de Alimentación a Chancado		Razón Estéril-mineral		Alimentación a Chancado	
Metodología	Media (%)	Coeficiente de Variación	Media	Coeficiente de Variación	Media (Ton/hr)	Coeficiente de Variación
MC	0,886	0,002	1,62	0,12	3.314	0,09
MDP	0,875	0,011	0,82	0,29	5.100	0,09
White y Olson (1992)	0,857	0,003	0,51	0,18	7.392	0,11
Li (1990)	0,862	0,004	0,44	0,20	8.114	0,12
Temeng et al. (1997)	0,878	0,003	0,74	0,05	6.500	0,09
GAS	0,855	0,005	0,41	0,24	7.885	0,11
SRDM	0,843	0,003	0,45	0,21	7.928	0,12
SRDM Mixto	0,856	0,004	0,42	0,22	7.998	0,12

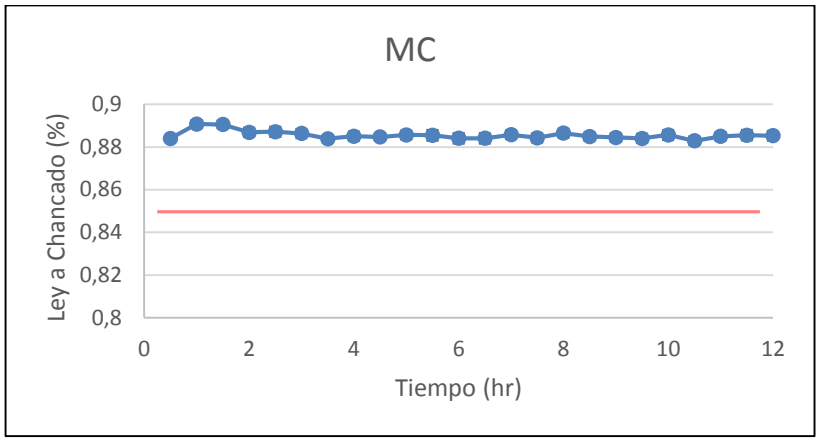


Figura 5-77. Ley de mineral a chancado, MC, escenario 3.

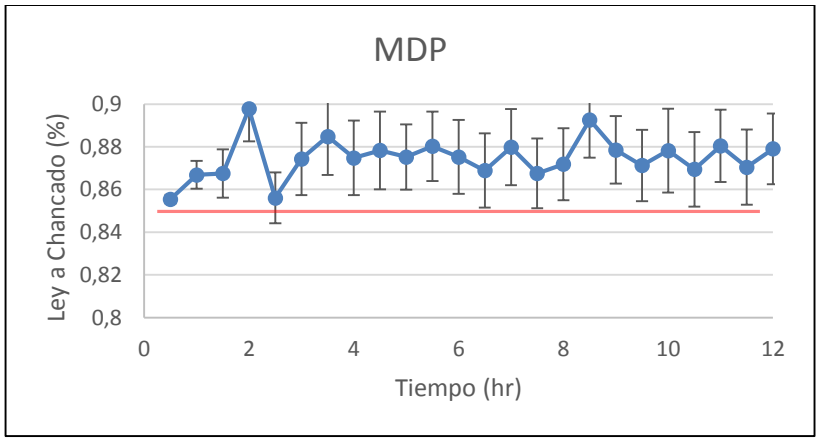


Figura 5-78. Ley de mineral a chancado, MDP, escenario 3.

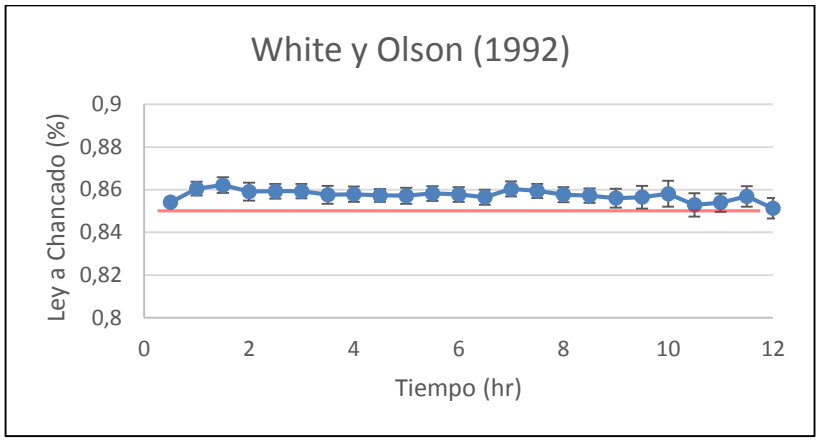


Figura 5-79. Ley de mineral a chancado, White y Olson (1992), escenario 3.

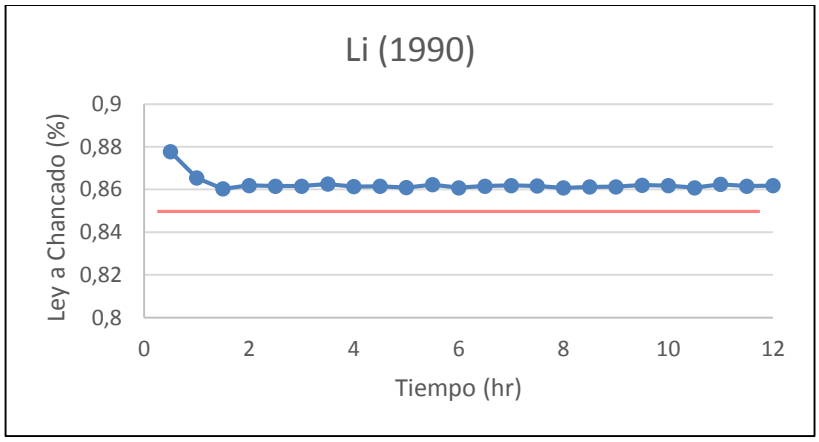


Figura 5-80. Ley de mineral a chancado, Li (1990), escenario 3.

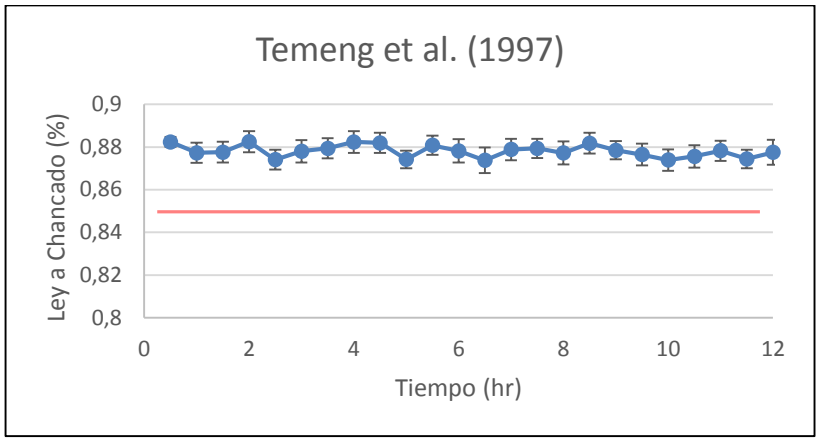


Figura 5-81. Ley de mineral a chancado, Temeng et al. (1997), escenario 3.

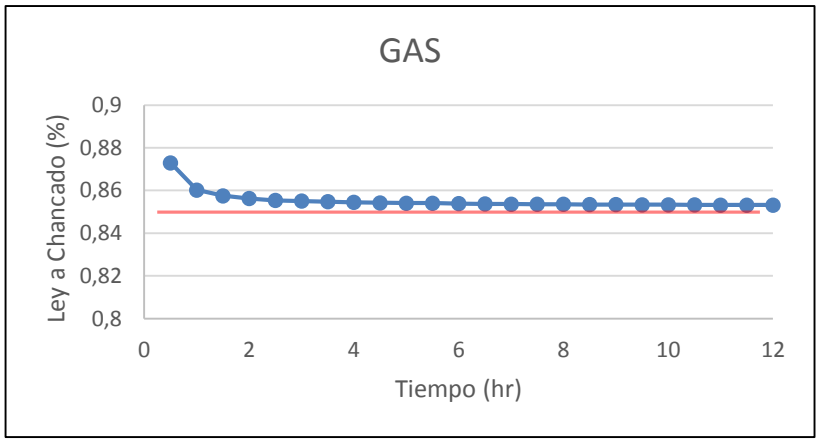


Figura 5-82. Ley de mineral a chancado, GAS, escenario 3.

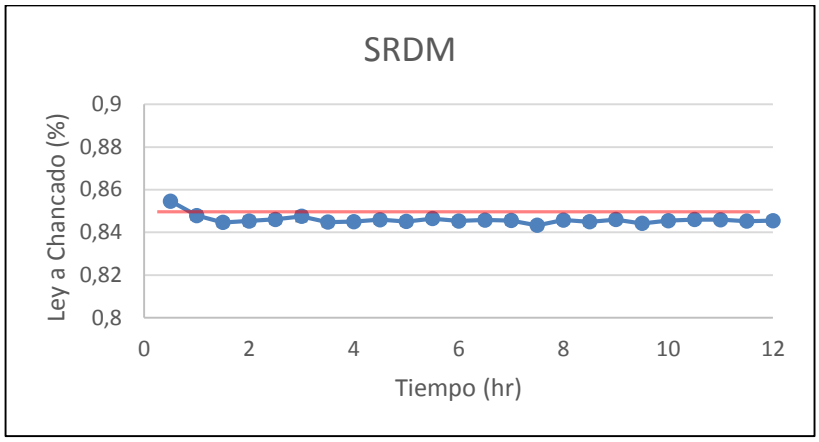


Figura 5-83. Ley de mineral a chancado, SRDM, escenario 3.

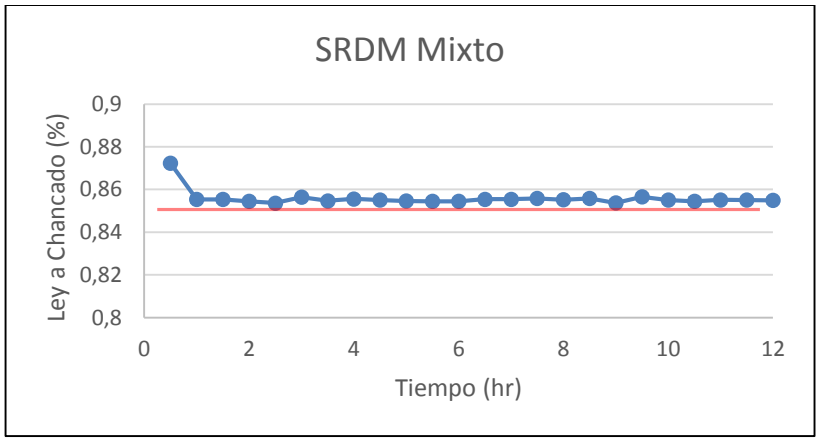


Figura 5-84. Ley de mineral a chancado, SRDM Mixto, escenario 3.

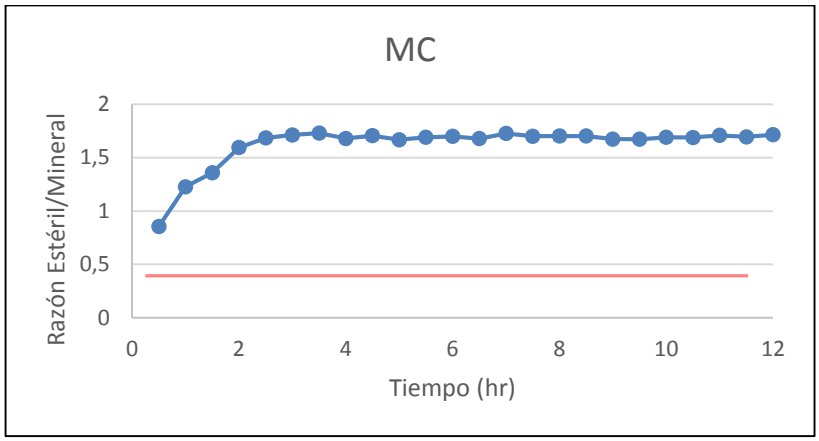


Figura 5-85. Razón estéril-mineral, MC, escenario 3.

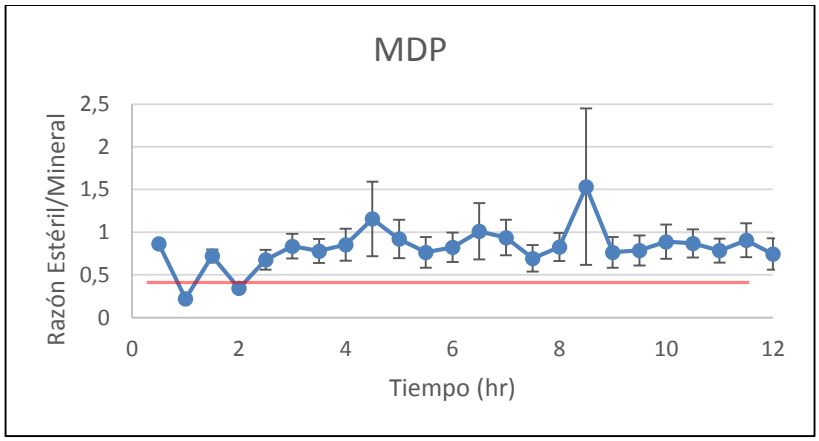


Figura 5-86. Razón estéril-mineral, MDP, escenario 3.

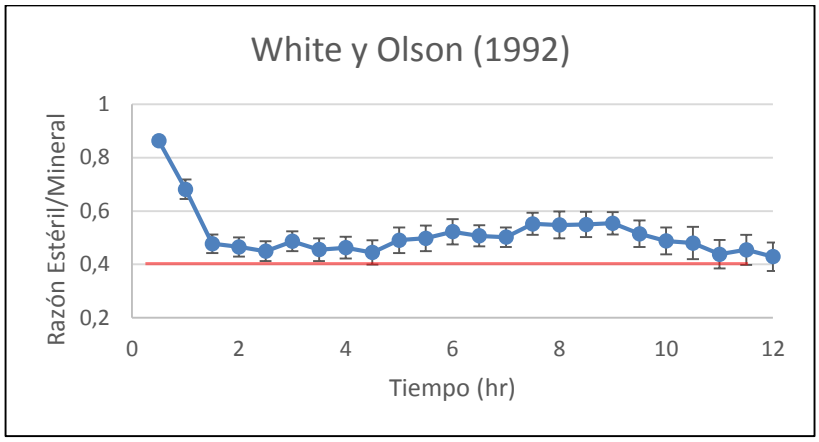


Figura 5-87. Razón estéril-mineral, White y Olson (1992), escenario 3.

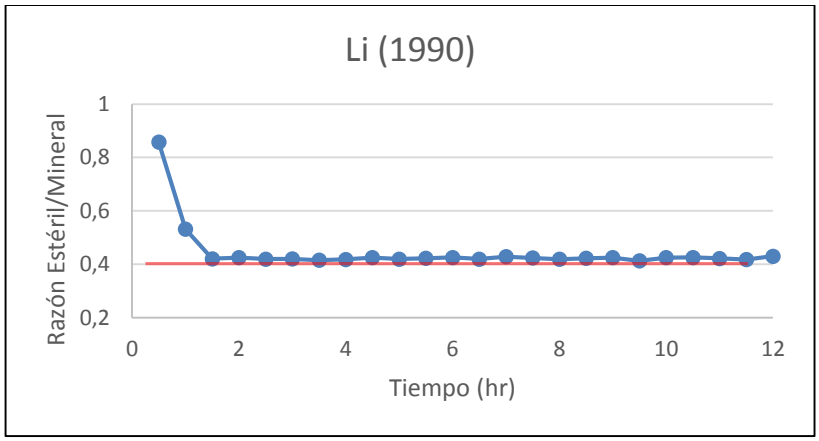


Figura 5-88. Razón estéril-mineral, Li (1990), escenario 3.

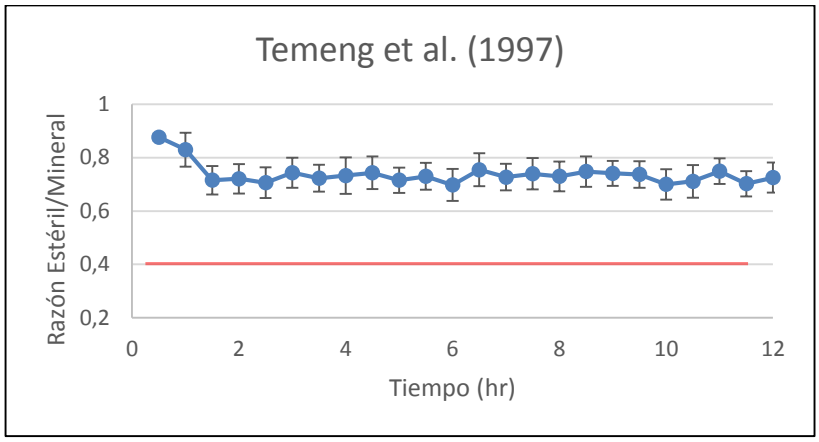


Figura 5-89. Razón estéril-mineral, Temeng et al. (1997), escenario 3.

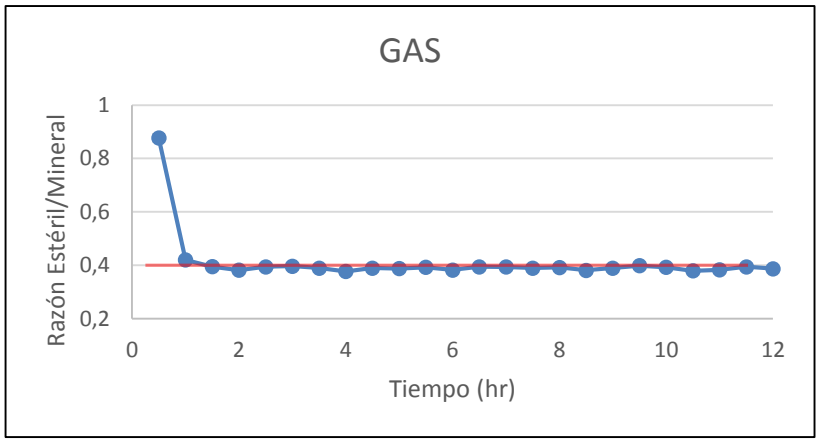


Figura 5-90. Razón estéril-mineral, GAS, escenario 3.

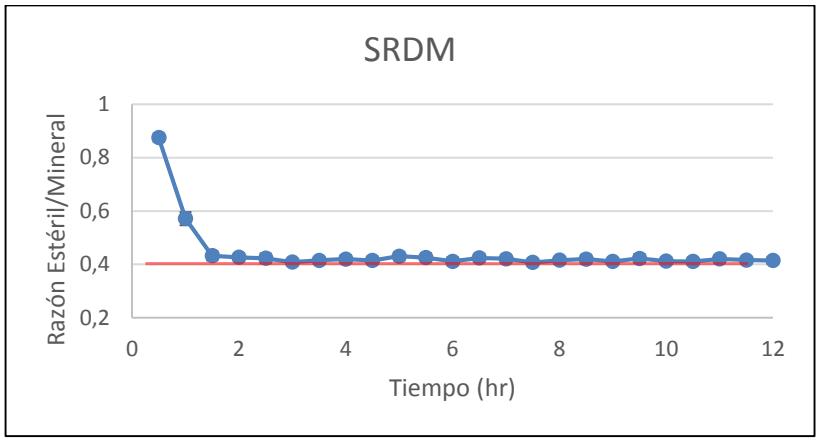


Figura 5-91. Razón estéril-mineral, SRDM, escenario 3.

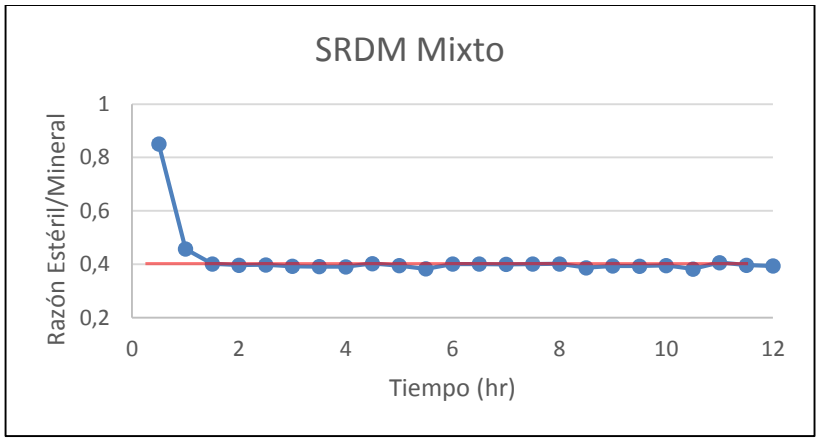


Figura 5-92. Razón estéril-mineral, SRDM Mixto, escenario 3.

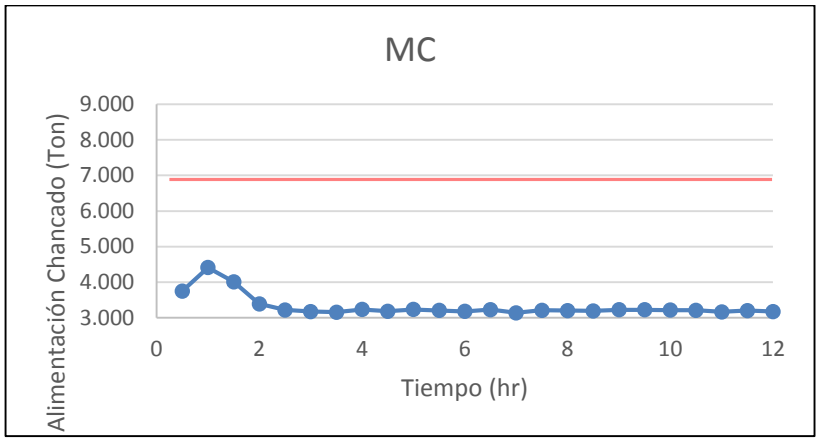


Figura 5-93. Alimentación a chancador, MC, escenario 3.

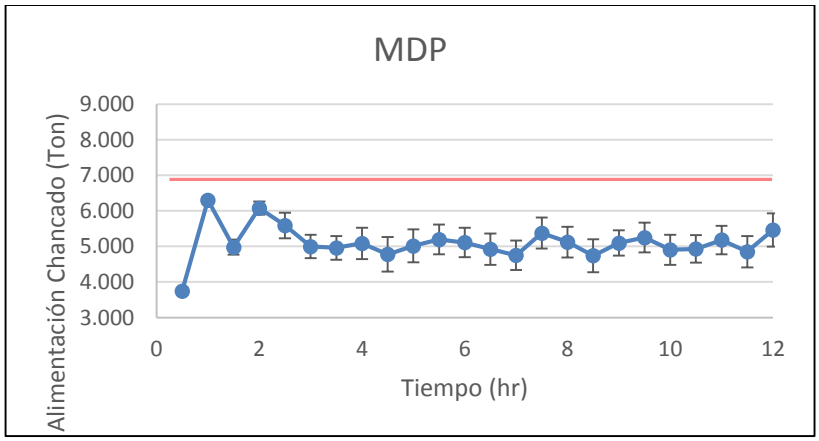


Figura 5-94. Alimentación a chancador, MDP, escenario 3.

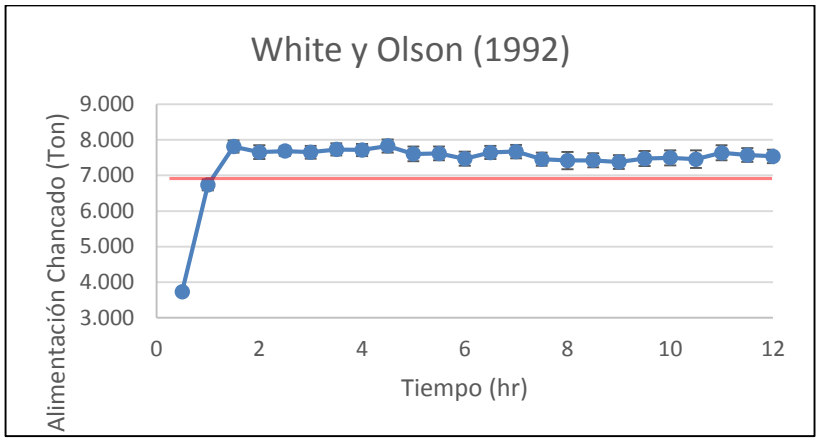


Figura 5-95. Alimentación a chancador, White y Olson (1992), escenario 3.

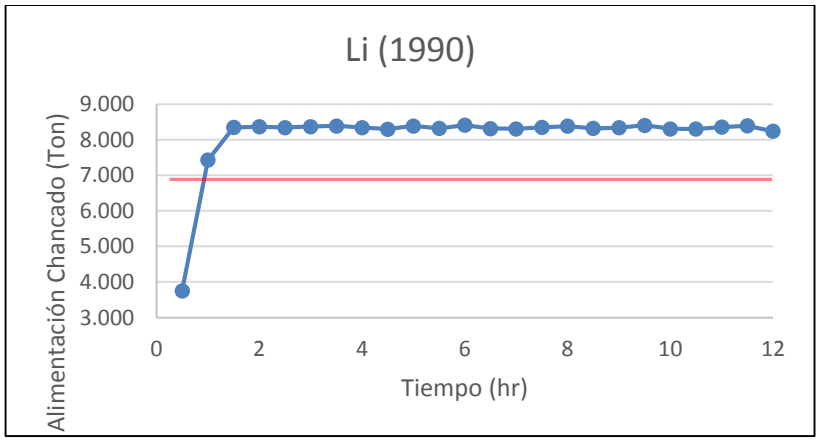


Figura 5-96. Alimentación a chancador, Li (1990), escenario 3.

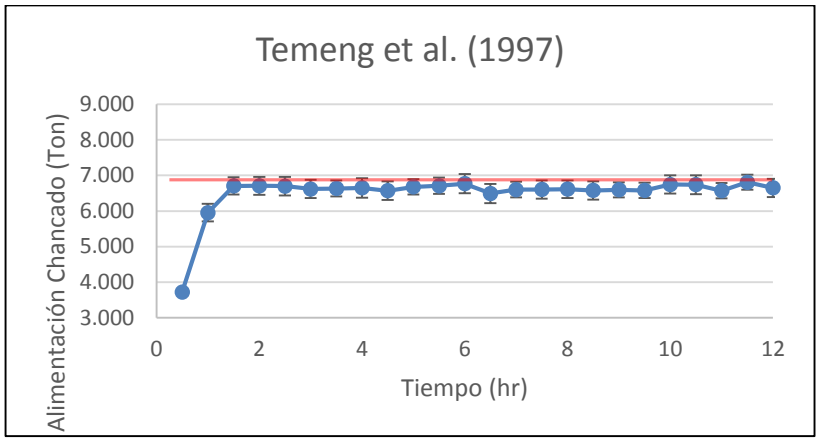


Figura 5-97. Alimentación a chancador, Temeng et al. (1997), escenario 3.

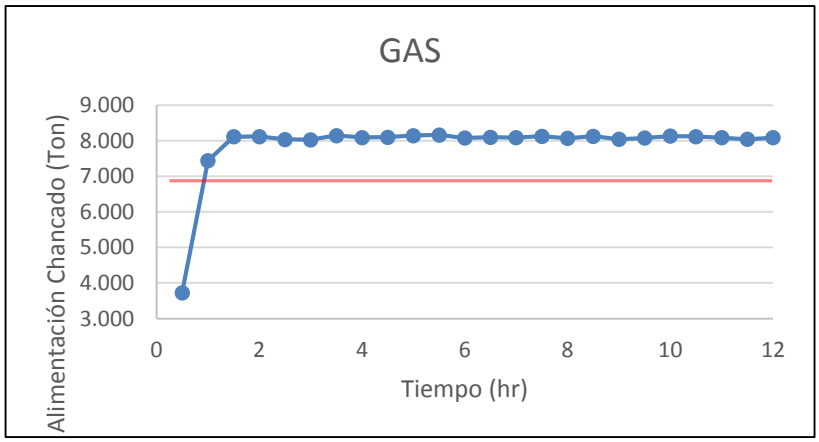


Figura 5-98. Alimentación a chancador, GAS, escenario 3.

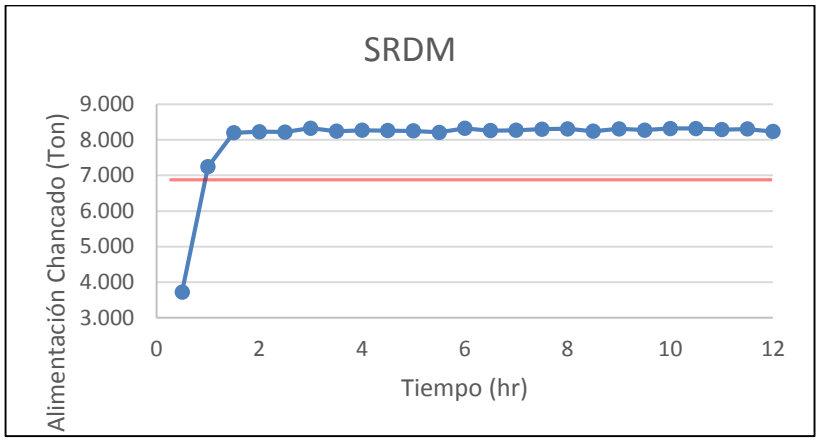


Figura 5-99. Alimentación a chancador, SRDM, escenario 3.

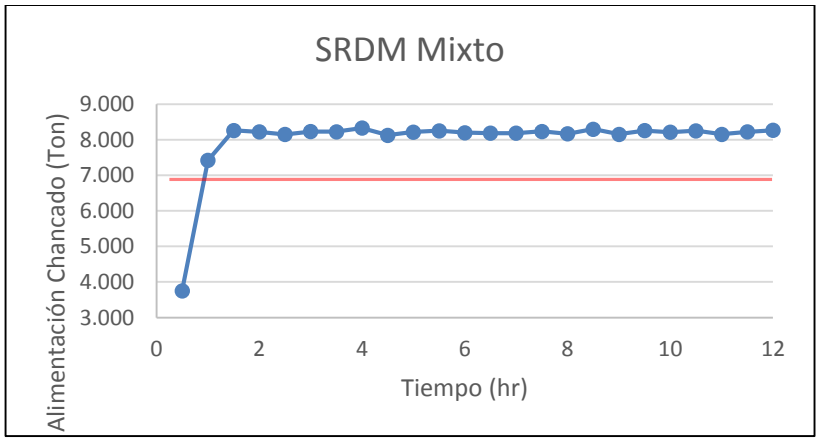


Figura 5-100. Alimentación a chancador, SRDM Mixto, escenario 3.

6 CONCLUSIONES

La principal contribución de este trabajo es presentar metodologías de despacho de camiones en minería a cielo basadas en simulación on-line, además de realizar un estudio de simulación para comparar su desempeño con otros métodos de despacho de camiones disponibles en la literatura y ampliamente utilizados en la industria minera, debido a su efecto positivo en los costos de operación asociados al transporte de material.

La simulación fue utilizada en este análisis para representar el comportamiento de una operación minera a cielo abierto, y realizar una comparación en condiciones equivalentes para todas las metodologías evaluadas.

Una operación minera a cielo abierto es un sistema complejo, que enfrenta condiciones operativas afectas a factores de variabilidad, como la duración de los tiempos de carga, descarga y transporte; y que adicionalmente tiene la necesidad de tomar un gran número de decisiones operacionales en tiempo real durante un turno de operación.

En este trabajo, se presentó el resultado de la implementación de 8 metodologías de despacho de camiones: 2 métodos heurísticos, MC y MDP, clasificados como 1 camión para n palas; 3 métodos que siguen flujos material, presentados por White y Olson (1992), Li (1990) y Temeng et al. (1997), donde el primero se clasifica como m camiones para 1 pala, el segundo como q camión para n palas y el último como m camiones para n palas; y finalmente, 3 métodos basados en simulación on-line, GAS, SRDM y SRDM Mixto, el primero que utiliza la simulación de diferentes soluciones generadas aleatoriamente, el segundo, basado en la comparación mediante simulación de diferentes metodologías de despacho, y el tercero la combinación de ambos.

Las variables consideradas en el estudio de simulación fueron ley de mineral que llega a chancador, razón estéril-mineral y alimentación a chancador, todas medidas cada 30 minutos de operación. En base a estas medidas de desempeño, y su comportamiento durante la simulación, se observó resultados con desviaciones menores respecto al valor objetivo, tanto para ley de alimentación a chancado y razón estéril-mineral, al utilizar las técnicas basadas en simulación on-line, debido a la visibilidad de las consecuencias de

una decisión de despacho en las decisiones futuras que permite el uso de simulación para tomar decisiones en tiempo real. Dando lugar a una toma de decisiones que considera el impacto de la presente decisión en las decisiones futuras, considerando además el efecto de la variabilidad propia de los procesos de carguío y transporte en la toma de decisiones.

De esta forma, la toma de decisiones mediante simulación on-line no presenta el carácter "miope" de los métodos heurísticos, y adicionalmente, incluye el efecto de la variabilidad de los procesos en la toma de decisiones, logrando mejores estimaciones de las consecuencias futuras de la presente decisión de despacho que los métodos no basados en simulación on-line.

Los resultados del estudio de simulación mostraron la menor desviación respecto a los objetivos operacionales para las 3 metodologías basadas en simulación on-line propuestas, en todos los escenarios evaluados.

En el escenario base, que considera una operación con un número óptimo de camiones, el método SDRM Mixto presentó la menor desviación respecto a los objetivos operacionales entre todos los métodos evaluados, además de superar en un 2,8% la tasa de alimentación a chancado luego de 1,5 horas de operación, siendo el método que en menor tiempo logra estabilidad en las medidas de desempeño una vez iniciado el turno de operación. Esto último, resulta relevante dado que en operaciones mineras reales se atribuye gran parte de la ineficiencia operacional a los quiebres de producción, que representan períodos prolongados de baja productividad debido a la puesta en marcha de los equipos.

En el escenario 1, caracterizado por una subdotación de camiones, ninguna de las metodologías evaluadas alcanzó la tasa de alimentación a chancado objetivo, donde además de los métodos basados en simulación on-line destaca el método de White y Olson (1997), con una baja desviación respecto a los objetivos operacionales y una tasa de alimentación a chancado que superó al método SRDM en un 0,2%, aunque presentó resultados con mayor variabilidad que los métodos basados en simulación on-line.

En el escenario 2, que considera una sobredotación de camiones, los métodos basados en simulación on-line presentaron diferencias significativas en términos de la desviación de

los objetivos operacionales con respecto a las demás metodologías, donde los métodos SRDM y SRDM Mixto alcanzaron un valor medio para la ley de mineral a chancado coincidente con el valor objetivo, además la mayor tasa de alimentación a chancador, siendo esta última un 11% mayor a la obtenida por el método de White y Olson (1992). Por otra parte, se observó que el método GAS requiere de la evaluación de un número de soluciones mayor en este escenario, debido a la mayor cantidad de despachos que se solicitan por unidad de tiempo y al mayor tiempo de ciclo de los camiones a causa de la congestión en los puntos de carga y descarga, haciendo infactible el uso de esta metodología en minas que cuenten con gran número de equipos en operación.

En el escenario 3, que considera mayor dificultad para lograr el requerimiento de ley de mineral a chancado y un número de camines óptimo, nuevamente son los métodos basados en simulación on-line los que presentaron los mejores resultados en términos de la desviación respecto a los objetivos operacionales, y aunque el método de Li (1990) superó al método SRDM Mixto en un 1,4% en la tasa de alimentación a chancado, éste último presentó una desviación 3 y 2 veces menor en términos de ley de mineral a chancado y razón estéril-mineral, respectivamente, en relación al valor objetivo de ambas medidas de desempeño. En este escenario, nuevamente se vuelve infactible la utilización del método GAS, ya que debido a la variabilidad que presentan los resultados en cada una de las soluciones, el método requiere de la evaluación de un mayor número de soluciones para la correcta toma de decisiones en base a un estimador estadístico.

La mejor calidad de los resultados presentados por el método SRDM Mixto en los distintos escenarios evaluados demuestra la robustez del método, que le permite adecuarse a diferentes condiciones de operación, a través de la elección de la metodología de despacho que proporcione los mejores resultados operacionales en cada decisión. La principal ventaja de esta metodología, es que permite la utilización del método GAS en los escenarios 2 y 3, debido a que permite la toma de decisión por medio de éste solo en caso que resulte conveniente, evitando la obtención soluciones de despacho ineficientes proporcionadas por GAS en situaciones que requieren la exploración de un espacio factible demasiado amplio para ser evaluado en tiempo real.

6.1 Investigaciones futuras

Como futuras investigaciones, se propone la evaluación de las metodologías basadas en simulación on-line con la ocurrencia de interrupciones en la producción, dadas por el cese de operación de camiones, palas y chancadores. Adicionalmente, podría estudiarse el impacto de bloqueo de caminos en la mina y el uso de rutas alternativas para llegar de un punto a otro dentro de la operación

Una ventaja importante de utilizar técnicas de simulación on-line para la toma de decisiones de despacho de camiones, es la posibilidad de incorporar otro tipo de decisiones distintas al despacho, como por ejemplo el momento óptimo en que realizar la carga de combustible de los camiones, dependiendo de su ubicación, niveles de combustible y la congestión en el punto de carga, buscando minimizar el impacto de éstas operaciones en la productividad.

Como mejora al método GAS se propone la incorporación de técnicas sofisticadas de análisis de output, que reduzcan la cantidad de soluciones a evaluar y permitan comparar los resultados de diferentes decisiones de despacho con cierto nivel de confianza. Adicionalmente, se plantea el uso de técnicas híbridas que consideren el uso de simulación on-line y métodos de computación evolutiva, que permitan la exploración del espacio factible de soluciones de manera eficiente y la comparación entre éstas según reglas de dominancia en funciones de múltiples objetivos.

BIBLIOGRAFÍA

Alarie, S., & Gamache, M. (2002). Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 16*(1), 59-76.

Burt, C., & Caccetta, L. Equipment Selection for Surface Mining: A Review.

Czaplicki, J. M. (2009). Shovel-truck Systems: Modelling, Analysis, and Calculation. CRC Press/Balkema.

Dalal, M., Groel, B., & Prieditis, A. (2003, December). Dynamic scheduling I: real-time decision making using simulation. In Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation (pp. 1456-1464). Winter Simulation Conference.

Harmonosky, C. M. (1995, December). Simulation-based real-time scheduling: review of recent developments. In Proceedings of the 27th conference on Winter simulation (pp. 220-225). IEEE Computer Society.

Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). Introduction to mining engineering.

Hauck, R. F. (1973). A real-time dispatching algorithm for maximizing open-pit mine production under processing and blending requirements. Proc. Sem. Scheduling Mining, CIM, Montreal.

Joaquín Jara, J., Pérez, P., & Villalobos, P. (2010). Good deposits are not enough: Mining labor productivity analysis in the copper industry in Chile and Peru 1992–2009. Resources Policy, 35(4), 247-256.

Li, Z. (1990). A methodology for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining. Mining Science and Technology, 10(3), 337-340.

Munirathinam, M., & Yingling, J. C. (1994). A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining operations. International Journal of Surface Mining and Reclamation, 8(1), 1-15.

Newman, A. M., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eurek, K. (2010). A review of operations research in mine planning. Interfaces, 40(3), 222-245.

Rogers, P., & Gordon, R. J. (1993, December). Simulation for real-time decision making in manufacturing systems. In Proceedings of the 25th conference on Winter simulation (pp. 866-874). ACM.

Schmidt, L., & Gazmuri, P. (2012). On-line simulation for a real-time route dispatching problem. Journal of the Operational Research Society, 63(11), 1492-1498.

Smith, J. S., & Brett, P. A. (1996). Short Term Scheduling Using Discrete Event Simulation. Department of Industrial Engineering, Texas A&M University, Submitted to Southwestern Bell-Technology Resources, Inc.

Son, Y. J., & Wysk, R. A. (2001). Automatic simulation model generation for simulation-based, real-time shop floor control. Computers in Industry, 45(3), 291-308.

Soumis, F., Ethier, J., & Elbrond, J. (1989). Evaluation of the new truck dispatching procedure in the Mount Wright mine. In Trans. of APCOM XXII, International Symposia on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industries (pp. 674-682).

Soumis, F., Ethier, J., & Elbrond, J. (1989). Truck dispatching in an open pit mine. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 3(2), 115-119.

SOUSA BASTOS, Guilherme. Methods for Truck Dispatching in Open-Pit Mining. 2010. 140f. Thesis of Doctor in Science - Aeronautics Institute of Technology, Sao José dos Campos.

Subtil, R. F., Silva, D. M., & Alves, J. C. (2011). A Practical Approach to Truck Dispatch for Open pit Mines. In 35Th APCOM symposium (pp. 24-30).

Ta, C. H., Ingolfsson, A., & Doucette, J. (2010). Haul truck allocation via queueing theory. *European Journal of Operational Research*.

Ta, C. H., Kresta, J. V., Forbes, J. F., & Marquez, H. J. (2005). A stochastic optimization approach to mine truck allocation. International journal of surface mining, reclamation and environment, 19(3), 162-175.

Tavakoli, S., Mousavi, A., & Komashie, A. (2008, December). A generic framework for real-time discrete event simulation (DES) modelling. In Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation (pp. 1931-1938). Winter Simulation Conference.

Temeng, V. A., & Adviser-Otuonye, F. O. (1997). A computerized model for truck dispatching in open pit mines. Michigan Technological University.

Temeng, V. A., Otuonye, F. O., & Frendewey Jr, J. O. (1997). Real-time truck dispatching using a transportation algorithm. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 11(4), 203-207.

Wang, Q., Zhang, Y., Chen, C., & Xu, W. (2006, August). Open-pit mine truck real-time dispatching principle under macroscopic control. In Innovative Computing, Information and Control, 2006. ICICIC'06. First International Conference on (Vol. 1, pp. 702-706). IEEE.

White, J. W., & Olson, J. P. (1986). Computer-based dispatching in mines with concurrent operating objectives. Min. Eng.(Littleton, Colo.);(United States), 38(11).

White, J. W., & Olson, J. P., (1992). On improving truck/shovel productivity in open pit mines. *23rd APCOM Proceedings*, 739-746.

Xi, Y., & Yegulalp, T.M., (1994). Optimum dispatching algorithm for Anshan open-pit mine. *24th APCOM Proceedings*,426-433