

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Profesor Patrocinante

Facultad de ingeniería

Sra. Asieh Hekmat

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

**EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL SURGE LOADER
EN OPERACIONES DE CARGUÍO Y TRANSPORTE
DE MINERÍA CIELO ABIERTO**



IGNACIO ANDRÉS OSSES AGUAYO

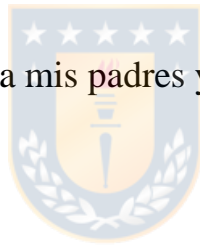
Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil de Minas

ENERO 2021

Dedicada a mis padres y mi hermana



Agradecimientos

En agradecimiento a la profesora Asieh Hekmat (docente Departamento de Ingeniería Metalúrgica (DIMET), Universidad de Concepción) por su ayuda durante todo el proceso del desarrollo de la memoria y previamente también, además de agradecer al Sustainable Minerals Institute (SMI) departamento de la Universidad de Queensland quien me recibió en mi pasantía, a Constanza Paredes (antigua docente Departamento de Ingeniería Metalúrgica (DIMET), Universidad de Concepción, actualmente candidata a un PhD en la Universidad de Queensland) quien me ayudo a gestionar mi postulación a mi pasantía en Australia, un especial agradecimiento al profesor Micah Nehring (docente del Sustainable Minerals Institute (SMI), Universidad de Queensland) quien me invito a trabajar en la investigación del *surge loader* durante mi pasantía y accedió a dejarme continuar esa investigación una vez terminada mi visita, permitiéndome usarla como tema de mi memoria, agradeciéndole a él también la confianza que me tuvo durante todo este proceso.

Finalmente agradecer a mi familia que me apoyo durante mis seis años en la universidad, ellos fueron los primeros que creyeron en mí y apoyaron mi decisión de elegir esta carrera, a mi madre que estuvo en mis mejores y peores momentos, a mi padre que siempre me motivo especialmente este último año durante el proceso de desarrollo de mi memoria y finalmente a mi hermana que nunca perdió la confianza en que podría terminar mi carrera.

Resumen

La industria minera en la actualidad se enfrenta a distintos desafíos, la disminución de la ley del mineral, la mayor profundidad de las operaciones, entre otras. Es por esto que la industria tiene la constante necesidad de mejorar y optimizar sus procesos por medio de la innovación, en este sentido los procesos de carguío y transporte en minería a cielo abierto han sido uno de los pocos que no ha sufrido grandes cambios. En esta investigación se muestra el impacto que generaría la incorporación del *surge loader* en la etapa de carguío y transporte, por medio del análisis de las características del equipo y efectos que genera en la producción.

El *surge loader* es un equipo completamente móvil compuesto por una tolva y un sistema de traspaso de material similar a un sistema de correas, su función principal es la de recibir el material transportado por la pala y traspasarlo al camión, el gran tamaño de su tolva permite recibir una gran cantidad de material, por lo que la pala pueda trabajar de forma continua, por otro lado su sistema de traspaso de material logra tiempos de carga del camión, menores a los de la pala sumado su sistema de cámaras y sensores permiten eliminar las maniobras que el camión realiza en el punto de carga, reduciendo así el tiempo de ciclo del camión. Su incorporación en las operaciones de carguío y transporte permitiría disminuir las interacciones de la pala con el camión, reduciendo así la probabilidad de accidentes en las operaciones. Hay que señalar que el sistema de alimentación del *surge loader* permite controlar el material cargado al camión, maximizando la carga del camión sin generar *overflowing*, por lo que este equipo aumentara la productividad y eficiencia.

Por medio del software Arena se simulo en seis diferentes escenarios el proceso de carguío y transporte con y sin la incorporación del *surge loader*, lo que permite por medio de la comparación de estos resultados evaluar el impacto que genera este equipo en los procesos de carguío y transporte. Las simulaciones realizadas en esta investigación muestran que la incorporación del *surge loader* aumenta productividad de los camiones en 13 % y utilización de las palas en un 11 %, este aumento es equivalente en la mayoría de los casos a incorporar dos camiones más a la flota de camiones. Al comparar los costos estimados del *surge loader* con los de dos camiones se observa que si bien el costo capital del *surge loader* es mayor a de dos camiones, el costo operacional es menor por lo que con el tiempo es económicamente más rentable trabajar con el *surge loader*, demostrando que el *surge loader* es una opción viable la etapa de carguío y transporte al optimizar los tiempos, disminuir los riesgos y aumentar la productividad, todo esto siendo rentable económicamente.

Abstract

The mining industry currently faces different challenges, the decrease in ore grade, the greater depth of the operations, among others. This is why the industry has the constant need to improve and optimize its processes through innovation; in this sense the haul stage of the open pit mine operations have been one of the few that has not made major changes. This research shows the impact that the incorporation of the surge loader would generate in the haul stage, through the analysis of the characteristics of the equipment and the effects it generates in the production.

The surge loader is a fully mobile machine consisting of a hopper and a material transfer system similar to a conveyor belt system, whose main function is to receive the material loaded by the shovel and transfer it to the truck. The large size of its hopper allows it to receive a large amount of material, as a result, the shovel utilization increases significantly. On the other hand, its material transfer system achieves loading times lower for the truck than the shovel, added, its system of cameras and sensors permits the elimination of the maneuvers that the truck performs at the loading point which leads to the reduction of the truck cycle times. The incorporation of the surge loader in loading and haulage stages, would allow the reduction of the interactions of the shovel with the truck, which results in decreasing accident probability in these operations. It should be noted that the surge loader feeding system can control the amount of material loaded into the truck. Therefore, it maximises the truck payload without overfilling it. Hence this equipment will raise the production rate and also fill a truck accurately every single time.

Using Arena software, the loading and haul stages were simulated with and without the incorporation of the surge loader in six different scenarios, which allows by comparing these results to evaluate the impact generated by this equipment in the those stages. The simulations made in this research show that the incorporation of the surge loader increases productivity of the truck by 13 % and the utilization of the shovels by 11 %. This increase in most of the cases is equivalent to incorporating two more trucks into the truck fleet. Comparing the estimated costs of the surge loader with those of two trucks, it is observed that although the capital cost of the surge loader is higher than two trucks, the operational cost is lower, so over time it is economically more profitable to work with the surge loader, showing that a surge loader is a viable option for the haul stage by optimizing times, reducing risks and increasing productivity, all this being economically more profitable.

Índice

<i>Capítulo 1: Introducción</i>	<i>1</i>
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodología	3
<i>Capítulo 2: Antecedentes</i>	<i>4</i>
2.1 Proceso de carguío y transporte	4
2.2 Sistema “Pala-Camión”	5
2.3 Sistema “Chancador y Correas transportadoras”	6
2.4 Mining Machinery Developments (MMD)	8
<i>Capítulo 3: Sistema surge loader</i>	<i>9</i>
3.1 Sistema de alimentación	10
3.2 Componentes principales del sistema de alimentación	11
3.3 Traspaso de material	11
3.4 Sistema de sensores y cámaras	12
3.5 Maniobrabilidad	13
3.6 Efecto del surge loader en la productividad del camión	14
3.7 Incremento de seguridad	16
<i>Capítulo 4: Desarrollo experimental</i>	<i>21</i>
4.1 Modelos software Arena	21
4.2 Modelo ciclo de trabajo de la pala	22
4.3 Modelo sistema Pala-Camión clásico	23
4.4 Modelo sistema Pala-Camión con la incorporación del surge loader.	24
4.5 Capacidad del surge loader	25
4.6 Evaluación efecto del surge loader en la productividad	26
<i>Capítulo 5: Resultados simulación</i>	<i>29</i>
5.1 Utilización pala	30
5.2 Productividad pala	31

5.3 Productividad camiones _____	33
<i>Capítulo 6: Análisis</i> _____	35
6.1 Análisis utilización pala _____	35
6.2 Análisis productividad pala _____	36
6.3 Análisis de la productividad camiones _____	37
6.4 Análisis tiempo de ciclo de los camiones _____	38
6.5 Análisis reducción de camiones _____	40
<i>Capítulo 7: Impacto económico</i> _____	41
<i>Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones</i> _____	44
8.1 Conclusiones _____	44
8.2 Recomendaciones _____	45
<i>Referencias</i> _____	46
<i>Anexos</i> _____	48
Anexo A: Módulos software Arena _____	48
Anexo B: Tiempo de los procesos de los modelos simulación _____	49
Anexo C: Información base de los casos de estudio _____	50
Anexo D: Resultados simulación _____	56

Lista de Tablas

TABLA 1: NÚMERO DE ACCIDENTES CON FATALIDADES DE PERÚ (2000-2016).	16
TABLA 2: NÚMERO DE ACCIDENTES CON FATALIDADES DE CHILE (2010-2019).	18
TABLA 3: ACCIDENTES EVITABLES DE AMBAS MUESTRAS.	19
TABLA 4: DESCRIPCIÓN CASOS SIMULADOS	27
TABLA 5: TIEMPOS DE CICLO Y ESPERA DE LOS CAMIONES EN AMBOS SISTEMAS.	38
TABLA 6: COSTOS DE LOS EQUIPOS.	41
TABLA 7: TIEMPOS DE LOS PROCESOS DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN.	49
TABLA 8: INFORMACIÓN BASE CASO A.	50
TABLA 9: INFORMACIÓN BASE CASO B.	51
TABLA 10: INFORMACIÓN BASE CASO C.	52
TABLA 11: INFORMACIÓN BASE CASO D.	53
TABLA 12: INFORMACIÓN BASE CASO E.	54
TABLA 13: INFORMACIÓN BASE CASO F.	55
TABLA 14: RESULTADOS PALA CASO A.	56
TABLA 15: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CLÁSICO CASO A.	56
TABLA 16: RESULTADO SISTEMA PALA-CAMIÓN CON <i>SURGE LOADER</i> INCLUIDO CASO A.	57
TABLA 17: RESULTADOS PALA CASO B.	58
TABLA 18: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CLÁSICO CASO B.	58
TABLA 19: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CON <i>SURGE LOADER</i> INCLUIDO CASO B.	59
TABLA 20: RESULTADOS PALA CASO C.	60
TABLA 21: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CLÁSICO CASO C.	60
TABLA 22: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CON <i>SURGE LOADER</i> INCLUIDO CASO C.	61
TABLA 23: RESULTADOS PALA CASO D.	62
TABLA 24: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CLÁSICO CASO D.	62
TABLA 25: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CON <i>SURGE LOADER</i> INCLUIDO CASO D.	63
TABLA 26: RESULTADOS PALA CASO E.	64
TABLA 27: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CLÁSICO CASO E.	64
TABLA 28: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CON <i>SURGE LOADER</i> INCLUIDO CASO E.	65
TABLA 29: RESULTADOS PALA CASO F.	66
TABLA 30: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CLÁSICO CASO F.	66
TABLA 31: RESULTADOS SISTEMA PALA-CAMIÓN CON <i>SURGE LOADER</i> INCLUIDO CASO F.	67

Lista de Figuras

FIGURA 1: PROCESO DE TRABAJO. _____	3
FIGURA 2: CICLO SISTEMA PALA-CAMIÓN. _____	5
FIGURA 3: CICLO SISTEMA CHANCADOR Y CORREAS TRANSPORTADORAS. _____	6
FIGURA 4: INFRAESTRUCTURA DEL SISTEMA DE CORREAS. [16] _____	7
FIGURA 5: EJEMPLIFICACIÓN DEL SISTEMA CHANCADOR Y CORREAS TRANSPORTADORAS. [17] ____	7
FIGURA 6: NUEVO SISTEMA PALA-CAMIÓN. _____	9
FIGURA 7: EQUIPO “FULLY MOBILE SURGE LOADER” DE MMD [18]. _____	10
FIGURA 8: SISTEMA DE ALIMENTACIÓN Y CARGA (COLOMBIA) [21]. _____	10
FIGURA 9: PLACAS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN [22]. _____	11
FIGURA 10: MÉTODOS DE MOVILIDAD E IMPACTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN [22]. _____	11
FIGURA 11: SECUENCIA DE TRASPASO DE MATERIAL [21]. _____	12
FIGURA 12: SITUACIÓN DE PRESENCIA DE UN BOLÓN EN CORREA DE TRASPASO DE MATERIAL [21]. _____	12
FIGURA 13: SISTEMA DE CÁMARAS. [21] _____	13
FIGURA 14: SISTEMA DE SENSORES. [21] _____	13
FIGURA 15: RUTAS DE CARGA CON EL SURGE LOADER. [21] _____	14
FIGURA 16: PORCENTAJES DE LOS ACCIDENTES FATALES PERÚ 2000-2016. _____	17
FIGURA 17: PORCENTAJES DE LOS ACCIDENTES FATALES CHILE 2010-2019. _____	18
FIGURA 18: PORCENTAJE ACCIDENTES EVITABLES DE AMBAS MUESTRAS. _____	20
FIGURA 19: COSTOS DE PROCESAMIENTO MINERÍA CIELO ABIERTO. [5] _____	21
FIGURA 20: MODELO DE SIMULACIÓN SOFTWARE ARENA DE CICLO DE LA PALA. _____	23
FIGURA 21: MODELO DE SIMULACIÓN SOFTWARE ARENA DEL CICLO CAMIÓN. _____	24
FIGURA 22: MODELO DE SIMULACIÓN SOFTWARE ARENA DEL CICLO DEL SURGE LOADER. _____	25
FIGURA 23: RELACIÓN ENTRE CAPACIDAD DEL <i>SURGE LOADER</i> Y DISMINUCIÓN DE CAMIONES. ____	26
FIGURA 24: ESQUEMA SITUACIÓN SISTEMA PALA-CAMIÓN CLÁSICA. _____	28
FIGURA 25: ESQUEMA SITUACIÓN SISTEMA PALA-CAMIÓN CON LA INCLUSIÓN DEL SURGE LOADER. _____	28
FIGURA 26: UTILIZACIÓN PALA. _____	30
FIGURA 27: PRODUCTIVIDAD PALA. _____	31
FIGURA 28: PRODUCTIVIDAD MÁXIMA DE LA PALA. _____	32
FIGURA 29: PRODUCTIVIDAD CAMIONES. _____	33
FIGURA 30: PRODUCTIVIDAD MÁXIMO DE LOS CAMIONES. _____	34

FIGURA 31: PORCENTAJE INCREMENTO UTILIZACIÓN DE LA PALA. _____	35
FIGURA 32: PORCENTAJE DE INCREMENTO EN LA PRODUCTIVIDAD DE LA PALA. _____	36
FIGURA 33: PORCENTAJE DE INCREMENTO EN LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CAMIONES. _____	37
FIGURA 34: REDUCCIÓN PORCENTUAL DE TIEMPOS DE ESPERA DEL CAMIÓN. _____	39
FIGURA 35: REDUCCIÓN DE CAMIONES EN EL SISTEMA AL INCLUIR EL SURGE LOADER. _____	40
FIGURA 36: PROYECCIÓN DE LOS COSTOS DE LOS EQUIPOS. _____	42
FIGURA 37: COSTO EXTRACCIÓN DE LA PALA. _____	43
FIGURA 38: MÓDULOS Y DEFINICIONES SOFTWARE ARENA. _____	48



Lista de ecuaciones

ECUACIÓN 1: PRODUCTIVIDAD DEL CAMIÓN. _____	15
ECUACIÓN 2: PRODUCTIVIDAD DE CAMIONES. _____	29
ECUACIÓN 3: PRODUCTIVIDAD PALA. _____	29
ECUACIÓN 4: UTILIZACIÓN PALA. _____	29



Nomenclatura y definiciones

RFID: “Radio Frequency Identification”, es un tipo de comunicación de forma inalámbrica que usa ondas electromagnéticas para identificar objetos.

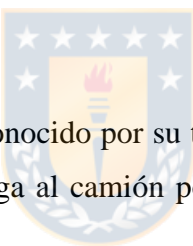
MMD: “Mining Machinery Developments”, empresa minera creadora del *surge loader*.

STs: “Shovel-Truck system”, sistema minero de carguío y transporte basado en el uso de palas y camiones.

IPCCs: “In Pit Crusher Conveyor system”, sistema minero de carguío y transporte basado en el uso de correas transportadoras.

Indexing: término utilizado para referirse a caminos de doble vía en las faenas mineras que se usan en la ida y vuelta de los camiones.

Sistema de carga unilateral: también conocido por su término en inglés “single side loading”, es un sistema de carga donde la pala carga al camión por un solo lado, realizando giros de hasta 90°.



Capítulo 1: Introducción

La constante demanda del mercado por recursos minerales no renovables ha generado la necesidad de disminuir las leyes de los mineral [1], esta disminución genera un gran desafío para la industria minera al enfrentarse a procesos cada vez más costosos[1], por lo que aumentar la productividad de las operaciones se hace necesario [2]. Para enfrentar este desafío las operaciones de la mina buscan en la innovación una forma de optimizar sus distintos procesos, la innovación resulta ser una muy buena herramienta que ayuda a reducir costos y/o aumentar la productividad, sin estas mejorar las operaciones de la mina pueden verse comprometidas y terminar condenando al fracaso los futuros proyectos mineros[1].

En las operaciones de carguío y transporte bajo el sistema Pala-Camión no alcanzan su máxima productividad por los tiempos de espera que se generan bajo este sistema [3], la mayoría de estos tiempos se dan durante la interacción de la pala con el camión [3]. Por esta razón que la presente memoria busca determinar los beneficios en las operaciones mineras a cielo abierto que tendría la incorporación de un equipo intermediario entre la pala y el camión como lo es el *surge loader* de Mining Machinery Developments (MMD), y si estos beneficios hacen a este equipo una opción viable para la industria minera. El *surge loader* es el resultado de la búsqueda de MMD por innovar la etapa de carguío y transporte en las operaciones mineras a cielo abierto, dando como resultado de esta búsqueda un equipo que promete aumentar la utilización de las palas y reducir el tiempo de ciclo de los camiones, optimizando así la etapa de carguío y transporte.

Actualmente, en las operaciones mineras a cielo abierto uno de los mayores costos está radicado en la etapa de carguío y transporte [4], y la principal razón es por el uso del sistema Pala-Camión en esta etapa, si bien el sistema presenta grandes ventajas también presenta grandes costos, por esta razón que es clave para el futuro de estas operaciones encontrar formas de mejorar el sistema Pala-Camión que actualmente se usa, en este contexto la incorporación de un equipo como el *surge loader* a este sistema aparece como una solución viable.

1.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta memoria es analizar los beneficios que traería la incorporación de un *surge loader* al sistema Pala-Camión actualmente utilizado en la etapa de carguío y transporte por la mayoría de las minas a cielo abierto.

1.2 Objetivos específicos

Los objetivos secundarios de esta memoria son:

- 1) Investigar y dar a conocer el funcionamiento del *surge loader* y como este cambiaría la dinámica del sistema Pala-Camión usado actualmente en la etapa de carguío y transporte.
- 2) Comparar la productividad y utilización de la pala y los camiones del sistema Pala-Camión convencional y el sistema Pala-Camión con la incorporación del *surge loader*, en base a simulaciones de distintos escenarios.
- 3) Analizar el impacto económico a largo plazo que traería consigo la nueva dinámica del sistema Pala-Camión a las operaciones mineras a cielo abierto.
- 4) Analizar los efectos en la seguridad de las operaciones de carguío y transporte que significaría la incorporación del *surge loader*.

1.3 Metodología

Para lograr los objetivos de este estudio, en un primer paso se ha realizado un amplio estudio sobre el *surge loader*, su aplicación y características. Luego, teniendo la información del proceso de carguío y transporte de una mina a cielo abierto, se ha evaluado el efecto del *surge loader* a través de diferentes modelos de simulación, cuyos resultados se analizaron y utilizaron para un posterior análisis económico. La Figura 1 muestra los diferentes pasos que se han llevado a cabo en este proyecto.

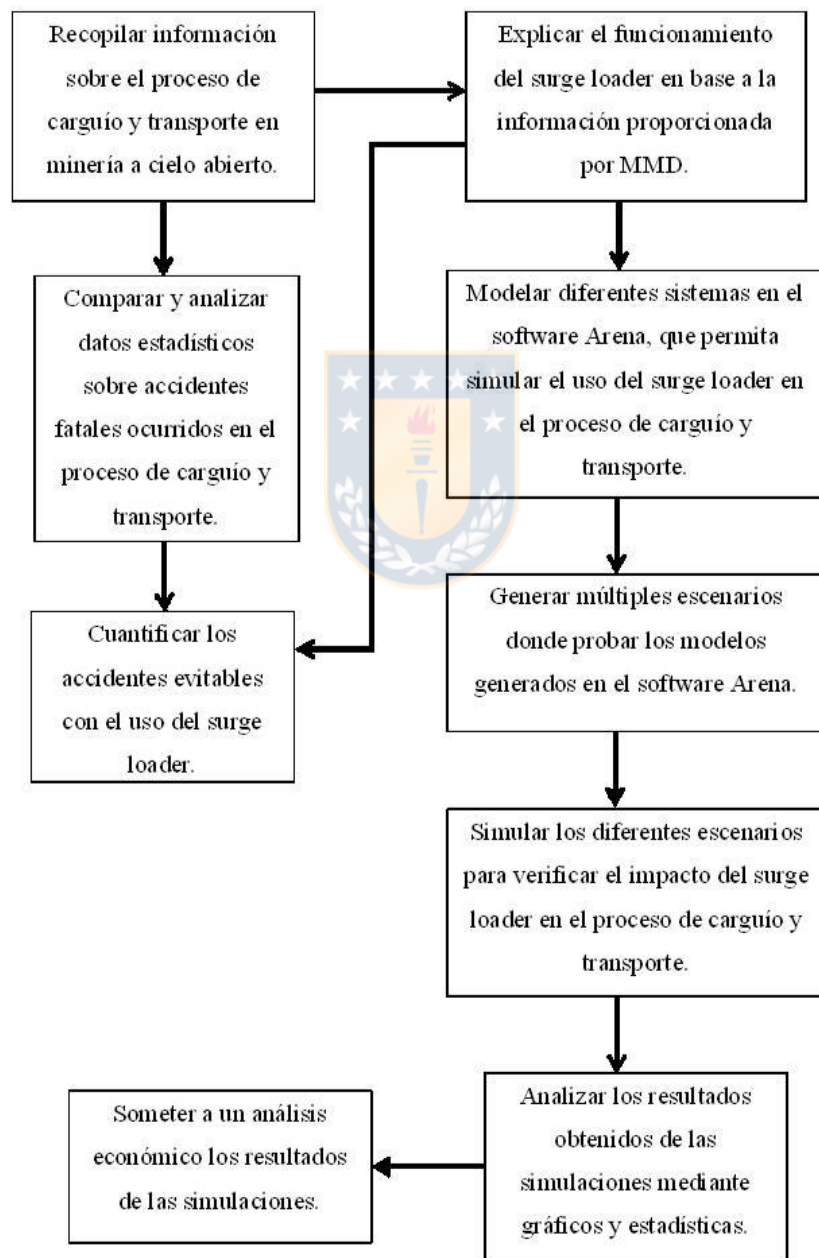


Figura 1: Proceso de trabajo.

Capítulo 2: Antecedentes

2.1 Proceso de carguío y transporte

La minería a cielo abierto se divide en diferentes procesos, desde la planeación hasta los procesos metalúrgicos, cada proceso es vital para el funcionamiento de la operación minera [5]. En operaciones de minería a cielo abierto, el proceso de carguío y transporte de mineral tiene una gran importancia en la producción global de la faena minera, debido a que el rendimiento en esta fase marca la producción que puede alcanzar la operación minera al limitar la extracción y el procesamiento de mineral [6], por lo que el trabajar con el sistema de carguío y transporte correcto es fundamental para maximizar la productividad de la mina [7].

Esta etapa consiste en el proceso de trasladar el material o estéril fragmentado previamente por el proceso de tronadura, este proceso se divide en dos fases, la primera consta de la carga del material mineralizado y/o estéril del yacimiento para conducirlo a la siguiente etapa o destino (stock, botadero o procesamiento), la segunda fase es la del traslado a su destino del material previamente cargado [8].

El carguío y transporte de mineral representa entre el 35-55% de los costos de la faena [9], además de que la creciente demanda del mercado ha hecho necesario aumentar la profundidad de los pits, lo que ha significado un aumento de los costos de transporte [6], por esta razón uno de los principales desafíos para las operaciones de minería a cielo es optimizar el proceso de carguío y transporte de mineral, esta mejora podría significar el poder extraer mineral a mayor profundidad sin sacrificar productividad y/o ganancias, lo cual llevaría a un aumento de la vida útil de estas operaciones mineras [5].

2.2 Sistema "Pala-Camión"

Actualmente el sistema más utilizado para el proceso de carguío y transporte es el sistema Pala-Camión (STs) [8] el cual consiste en un sistema donde la pala carga el mineral previamente tronado a un camión, el cual transporta el material de la faena minera a su destino (stock, botadero o chancador primario) donde lo descarga, luego el camión regresa donde está ubicada la pala y el ciclo se repite, esto se ejemplifica en la Figura 2. Este sistema se usa desde hace siglos, dado que es bastante simple y fácil de implementar en las operaciones mineras, además de ser sistema bastante confiable, flexible y efectivo [8]. Una de las principales ventajas de este sistema es su versatilidad, dado que solo necesita caminos aptos para la circulación de los camiones y no una infraestructura de mayor complejidad, esto permite que el sistema se acople con mayor facilidad al diseño de la mina, además de poder adaptarse a cualquier cambio en el diseño que se genere durante la producción, esto evita que el sistema Pala-Camión se ha un limitante en un proceso de expansión de la mina [10].

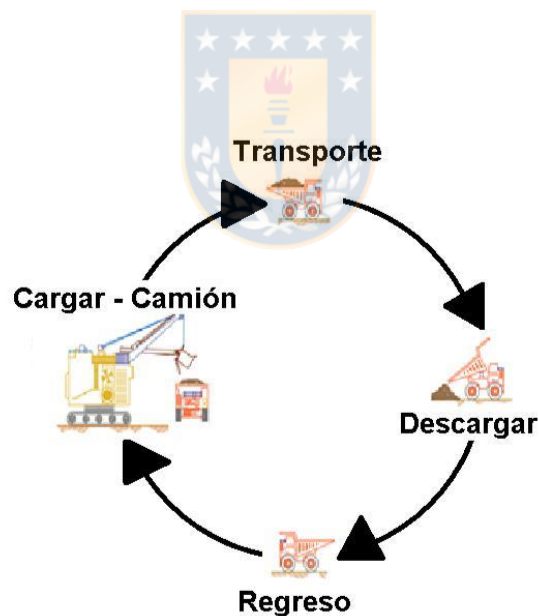


Figura 2: Ciclo sistema Pala-Camión.

El sistema Pala-Camión ha sufrido múltiples mejoras con el tiempo, una de ellas es la optimización de rutas, donde mediante un análisis estadístico y topográfico se selecciona la ruta más eficiente para el sistema, la cual disminuye el tiempo de ciclo y recude los costos de transporte [11, 12]. Todos estos cambios si bien mejoran el sistema no alteran su ciclo (Figura 2), siendo cambios al funcionamiento de los elementos del sistema y no alterando el ciclo del sistema Pala-Camión, por lo cual estos cambios no generan mejoras significativas a los resultados de este sistema.

2.3 Sistema “Chancador y Correas transportadoras”

Una forma de disminuir el tiempo en el proceso de carguío y transporte es con el uso del sistema de “Chancador y Correas Transportadoras” (IPCCs), el cual consiste en la carga del material previamente fragmentado en el proceso de tronadura a un chancador primario, para posteriormente transportarlo mediante correas a su destino (stock, botadero o procesamiento) [13], este sistema se puede observar en la Figura 3. Este sistema cuenta con diferentes variaciones las cuales dependen de la movilidad del chancador, por lo cual sistema puede ser fijo, semi-móvil o completamente móvil, en el primero el chancador no se puede mover por lo que el diseño del sistema se adecua a la posición de este equipo, en el segundo el equipo cuenta con una movilidad limitada y en el tercero el equipo cuenta con una movilidad completa permitiendo una mayor flexibilidad en el diseño [14], todas las variaciones de los sistemas de chancadores y correas transportadoras usan una infraestructura especial además de necesitar un pit con bajos ángulos [15].

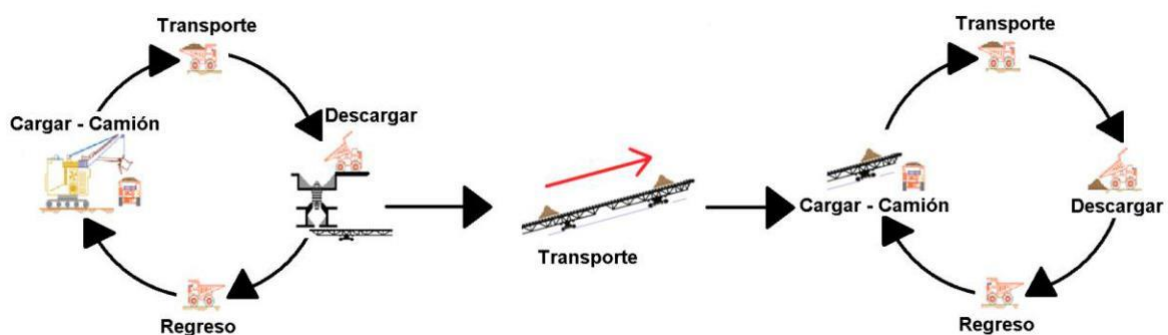


Figura 3: Ciclo sistema Chancador y Correas Transportadoras.

Uno de los principales problemas de estos sistemas es el gasto capital (CAPEX) necesaria para implementar este sistema, el cual es demasiado alto [16], dado que se necesitan una gran cantidad de equipos para poder instalar este sistema en el pit, además de la gran cantidad de

infraestructura que es necesaria para implementar el sistema de correas (Figura 4), estas infraestructuras necesitan condiciones especiales para su funcionamiento lo que en muchos casos conlleva a alterar el diseño original del pit [13], esto le otorga menor flexibilidad a la operación [16], esto se puede ver en la Figura 5, ahí se puede ver que los lugares de extracción están determinados por la posición de las correas, haciendo necesario mover toda la infraestructura de las correas para cambiar la secuencia de extracción.

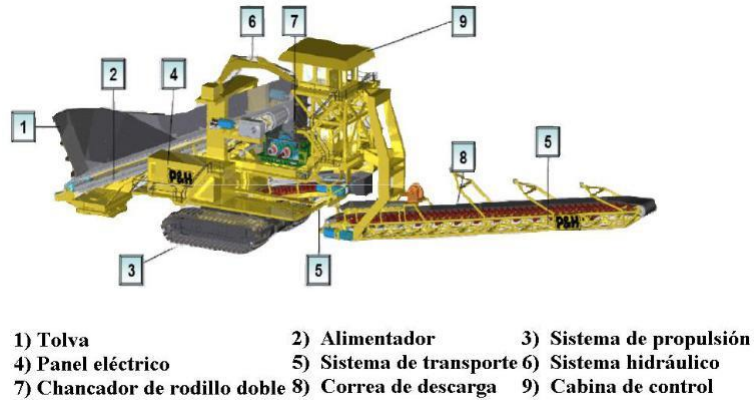


Figura 4: Infraestructura del sistema de correas. [16]

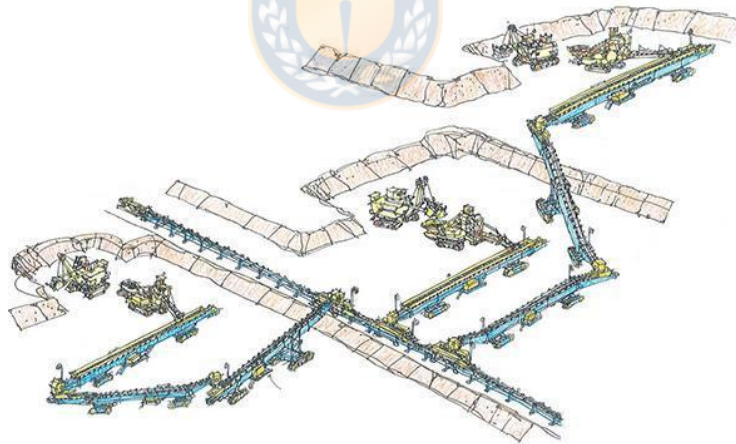


Figura 5: Ejemplificación del sistema Chancador y Correas Transportadoras. [17]

2.4 Mining Machinery Developments (MMD)

Mining Machinery Developments (MMD) es una compañía con más de 40 años de experiencia encargada de diseño, fabricación y suministro de diferentes equipos asociados a las industrias de la minería, extracción y reciclaje. MMD ha entregado soluciones innovadoras que mejoran la productividad, la rentabilidad y la seguridad de las operaciones, y al mismo tiempo minimizan el impacto ambiental.

Fundada en 1978 por Alan Potts, Mining Machinery Developments (MMD) se creó para diseñar y producir soluciones para la industria de la minería subterránea de carbón del Reino Unido, inicialmente diseñando y fabricando perforadoras, con los años comenzó a diseñar, patentar y fabricar diferentes tipos de chancadores, esto dio paso para que posteriormente diseñaran sistemas de alimentación u otros equipos como MMD Atlas Transporter, equipo que es capaz de transportar estaciones de chancado de manera segura y controlada.

MMD crea el *surge loader* como una mejora al clásico sistema Pala-Camión, el proyecto nace del interés de la minera Rio Tinto en utilizar un nuevo sistema de alimentación para los camiones en su subsidiaria Kennecott Land (Utah, Estados Unidos) en el año 2017, finalmente les tomo 2 años de desarrollo [18] la creación del *surge loader* le hizo a sus desarrolladores acreedores del “Minerals Processing of the Year Award” (auspiciado por CDE Global) en la Australian Mining Prospect Awards del 2019 [19].

Capítulo 3: Sistema surge loader

El *surge loader* es un equipo creado para utilizarse en la etapa de carguío de mineral, cuya principal función es recibir el material de la pala para posteriormente cargar al camión [18], por lo cual sirve de intermediario entre la pala y el camión, generando un aumento en la seguridad y en la productividad de esta etapa, dado que logra dividir el ciclo unitario del sistema Pala-Camión en dos ciclos independientes [18] como se observa en la Figura 6.

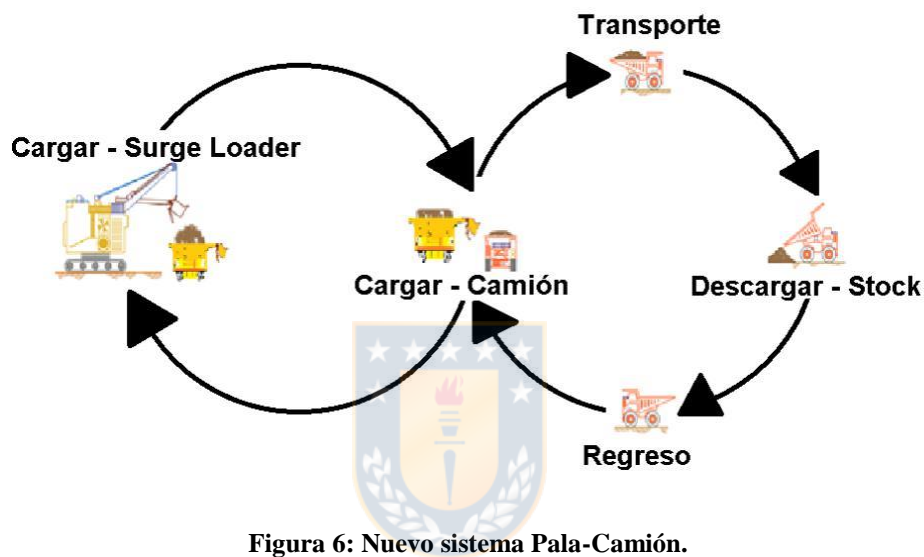


Figura 6: Nuevo sistema Pala-Camión.

El *surge loader* consiste en una tolva con una capacidad 2.5 veces la del camión que se usa en la faena minera [20], esta tolva recibe el material de la pala para posteriormente cargar este material al camión, como se observa en la Figura 7 lo que genera que la pala no depende de la presencia de un camión para completar su ciclo solo de la capacidad disponible de la tolva, esto elimina la directa dependencia entre la pala y el camión que existe en el sistema Pala-Camión clásico [21]. Además esta tolva tiene un sistema oruga que le da una completa movilidad para desplazarse por el rajo, lo cual le permite ser completamente autónomo [21] y acompañar a la pala durante toda su secuencia de trabajo en la mina [18], esto es una gran ventaja al compararse con otros sistemas de carguío y transporte usados en la minería a cielo abierto de movilidad y autonomía limitados como lo son los diferentes sistemas de chancadores y correas transportadoras [13].



Figura 7: Equipo “Fully Mobile Surge Loader” de MMD [18].

3.1 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación del *surge loader* se basa en el utilizado en el “Heavy Duty Apron Plate Feeder” (creado por MMD), utilizado en una mina de carbón en Colombia (Figura 8), el cual se sigue utilizando en la actualidad [21], esto ha permitido probar su funcionalidad bajo situaciones operativas, además de acreditar su eficiencia en el proceso de carga de equipos.



Figura 8: Sistema de alimentación y carga (Colombia) [21].

3.2 Componentes principales del sistema de alimentación

El sistema de alimentación se basa en placas de alta resistencia, diseñadas para manipular grandes impactos y materiales abrasivos [22]. En la práctica estas placas han destacado por su mínimo mantenimiento necesario y su larga vida útil, esto debido a su robustez y fiabilidad, las placas son fabricadas a partir de perfiles y son fijadas a la cadena, de forma que su unión impide el derrame de finos entre las placas como se aprecia en la Figura 9 [22].

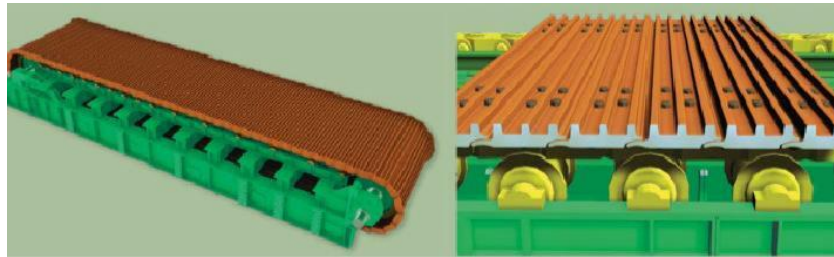


Figura 9: Placas del sistema de alimentación [22].

Una de las principales características del sistema de alimentación de placas de MMD son las cadenas y rodillos (fabricados por Caterpillar) fijados al bastidor principal como se observa en la Figura 10, estos destacan por su alta resistencia, la cual permite que la fuerza de impacto que no es absorbida por las placas se ha transmitida por los rieles para después ser disipada por el bastidor principal.

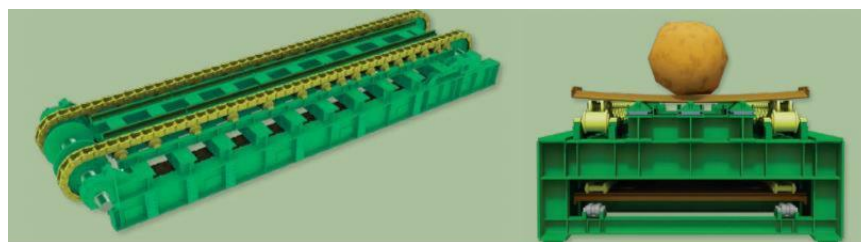


Figura 10: Métodos de movilidad e impacto del sistema de alimentación [22].

3.3 Traspaso de material

El traspaso de material entre el *surge loader* y el camión se realiza a través de una correa (compuesta por la unión de las placas) que lleva el material previamente depositado en la tolva por la pala hasta el camión como se aprecia en la Figura 11. La correa por medio de diferentes sensores es capaz de medir el volumen y el peso del material que está entregando logrando

controlar el factor de llenado (fill factor) del camión [20], [21], por medio de estos sensores el *surge loader* es capaz de detectar la presencia de bolones de gran tamaño los cuales pueden afectar al transporte de material [23], esta detección sumada a la información del material cargado al camión permite que el equipo decida si el camión es capaz de transportar este bolón sin sobrepasar los límites de seguridad [21], en el caso que la respuesta se ha negativa el *surge loader* detiene la descarga y da la señal para que el camión continúe su ciclo con la cantidad de material que alcanzo a cargar, además el sistema detección deja un remanente de material entre el bolón y la salida de material con el objetivo de que al momento de cargar al siguiente camión este material sirva como amortiguación al impacto de la descarga del bolón (Figura 12). El sistema de sensores le otorga una gran ventaja al *surge loader* sobre el sistema convencional de traspaso de material (sistema Pala-Camión), dado que permite controlar el factor de llenado del camión y en ciertos casos incluso aumentarlos [20].

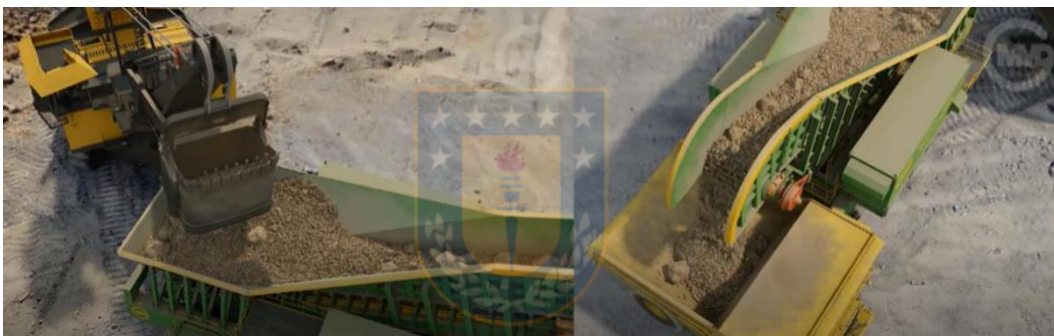


Figura 11: Secuencia de traspaso de material [21].



Figura 12: Situación de presencia de un bolón en correa de traspaso de material [21].

3.4 Sistema de sensores y cámaras

El *surge loader* usa un sistema de sensores y cámaras para la detección de los camiones, este sistema por medio de cámaras inteligentes 3D y sensores logra saber cuándo el camión se aproxima al punto de descarga como se aprecia en la Figura 13, luego utilizando sensores RFID es capaz de detectar cuando el camión está en punto exacto de carga del camión, tal como muestra la Figura 14, mandando una señal al camión para que se detenga, esto lo logra de forma

inalámbrica por medio de ondas electromagnéticas que consiguen comunicar al camión con el *surge loader* de forma casi inmediata, finalmente el *surge loader* vuelve a dar una señal al camión cuando este se encuentra cargado para que continúe su recorrido.

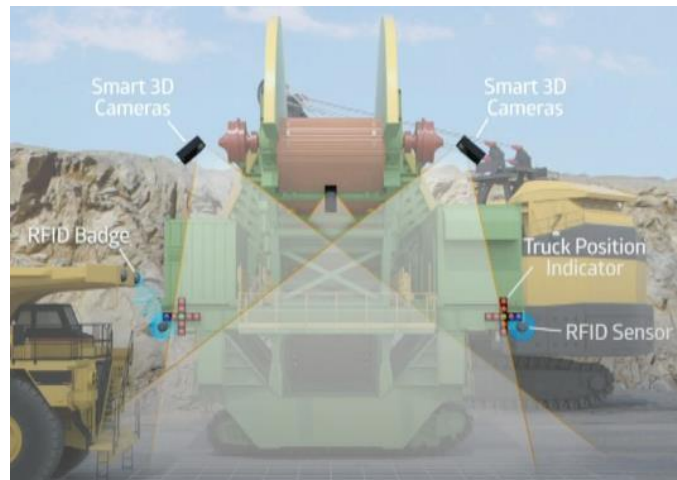


Figura 13: Sistema de cámaras. [21]



Figura 14: Sistema de sensores. [21]

3.5 Maniobrabilidad

El *surge loader* elimina la necesidad del camión de maniobrar para ubicarse cerca de la pala, esta es una etapa muy común en el sistema Pala-Camión clásico, esto junto al sistema de cámaras y sensores favorece a la automatización del proceso, al generar sistemas de comunicación inteligente entre el *surge loader* y el camión, además de permitirle a este último trabajar en rutas más simples (sin maniobras de posicionamiento), lo que genera que estas se han más directas como se aprecia en la Figura 15, por lo que la inclusión del *surge loader* a este sistema Pala-Camión permite trabajar con rutas de carguío más continuas que disminuyen el tiempo de ciclo del camión.



Figura 15: Rutas de carga con el surge loader. [21]

El sistema de detección por proximidad de equipos del *surge loader* y los camiones¹ de la faena traería beneficios como el mejoramiento en maniobras operativas (virajes, reversa, detención o salida de ruta), esto debido a la capacidad de detección y eliminación de los puntos ciegos [24]. La disminución de las probabilidades de impacto en maniobras normales de conducción, estacionamiento o mantenimiento es otro beneficio asociado al sistema de detección, esto tiene como consecuencia un prolongamiento de la vida útil de llantas, neumáticos, sistemas de eje y suspensión [24]. Los principales beneficios del sistema de detección radican en el aumento de la seguridad (al permitir la prevención de accidentes), la reducción de los costos de mantenimiento y la reducción del deterioro de activos importantes en la faena minera [24].

3.6 Efecto del surge loader en la productividad del camión

En el sistema Pala-Camión clásico (sin la inclusión del *surge loader*) el factor de llenado del camión depende enteramente de la pala y cuanto material esta pueda cargar al camión, lo que genera tres posibles escenarios: el primero es el escenario donde el camión sobrepasa su carga útil (*overflow*²), lo que genera un incremento en el riesgo de la operación de transporte del mineral [25], por esta razón se busca evitar este escenario; el segundo es el escenario donde ocurre todo

¹ No es un requisito trabajar con camiones con sistemas de detección de equipos para poder implementar el *surge loader*, el *surge loader* solo facilita la incorporación de este tipo de equipos a la faena.

² *Overflow*: término utilizado para referirse a la situación donde un equipo transporta material en una cantidad mayor al máximo de su capacidad.

lo contrario, es decir que se carga al camión con una carga menor a la carga útil (*underfill*³), esto genera que la productividad del camión se vea disminuida, este escenario es el más común; el tercer escenario es donde el camión se carga con la cantidad exacta de su carga útil, este escenario es el óptimo, pero por diferentes factores como la capacidad de carga de la pala o la eficiencia del operario es muy difícil de obtener. Esto hace que la elección de las palas y los camiones de cierta forma se han dependientes la una de la otra del punto de vista de la productividad de la operación, al buscar palas que puedan cargar al camión en ciclos enteros, o al revés camiones que puedan ser cargados en ciclos enteros, en cualquiera de las dos opciones siempre se busca ser lo más cercano al tercer escenario sin generar *overflow*.

El *surge loader* por medio de su sistema de alimentación del camión permite controlar la carga de material que el camión transporta, esto no solo resulta práctico desde un punto de vista de la reducción del tiempo de carga, sino que además el sistema de alimentación permite controlar el factor de llenado, al no depender de la capacidad de carga de la pala sino de la carga útil del camión, logrando un factor de llenado de 98% [21]⁴, este incremento permite acercarse bastante al escenario ideal, lo que se ve reflejado directamente en la productividad de las operaciones de transporte de mineral, como se aprecia en la Ecuación 1, donde se observa la relación entre el factor de llenado y la productividad.

Ecuación 1: Productividad del camión.

El uso del *surge loader* genera además que la elección de las palas y los camiones pasen a ser independiente la una de la otra, dado que el *surge loader* elimina la interacción de estos dos equipos. La independización de la elección de equipos permite ampliar la gama de palas y camiones disponibles para la operación dejando como principal limitante las condiciones de la faena minera.

³ Underfill: término utilizado para referirse a la situación donde un equipo transporta material en una cantidad menor al máximo de su capacidad.

⁴ El factor de llenado del 98% que logra el *surge loader* es un valor teórico, no un dato obtenido en pruebas en terreno.

3.7 Incremento de seguridad

Incrementar la seguridad en las operaciones mineras es una prioridad en la minera moderna [25], [26], por lo que uno de los desafíos actuales es encontrar nuevas formas que logren esto, pero sin disminuir la productividad de las operaciones [6]. Dentro de este contexto uno de los principales riesgos presentes en la minería a cielo abierto es la operación de carguío y transporte [25, 27], esto debido al sistema Pala-Camión usado típicamente en esta operación requiere la manipulación y directa interacción de equipos de gran envergadura, lo que aumenta los escenarios de riesgos y posibles accidentes [25].

En el escenario mundial en el ámbito de la minería Perú y Chile son grandes exponentes [26], por lo que usarlos de ejemplo sirve para obtener una mirada global de los accidentes mineros. En Perú el número de accidentes fatales registrados por el ministerio de energía y minas (MINEM) entre el año 2000 y el año 2016 muestra que 41 accidentes mineros se relacionaron con el proceso de carguío y transporte, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1: Número de accidentes con fatalidades de Perú (2000-2016).

Tipo de Accidente	Número de Accidentes
Caída de rocas	271
Caída de trabajadores	82
Tránsito de vehículos	76
Otros	65
Deslizamiento del terreno	63
Intoxicación y asfixia	70
Carguío y transporte	41
Explosiones	33
Maniobra de equipos	54
Energía eléctrica	38
Manipulación de materiales	19
Entierro por hundimiento de terreno	23
Herramientas	7
Total	842

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Gobierno de Perú.

Hay que mencionar que la mayoría de los accidentes registrados se concentran entre los primeros 7 años de la muestra (2000-2007). Si bien la operación de carguío y transporte no es la principal fuente de accidentes esta operación representa el 5% del total registrado lo cual no deja de ser un número importante al considerar que son accidentes con fatalidades (Figura 16).

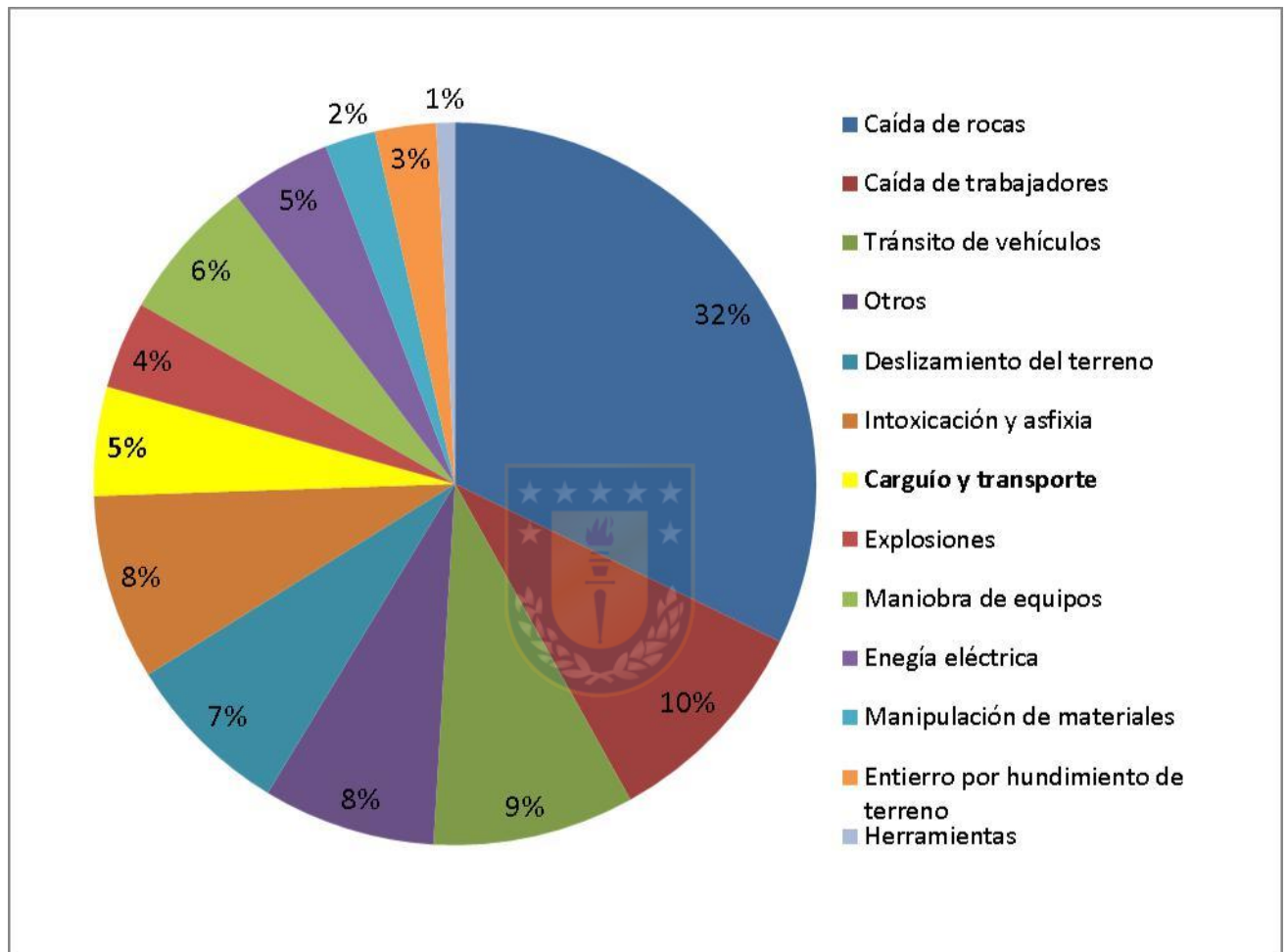


Figura 16: Porcentajes de los accidentes fatales Perú 2000-2016.

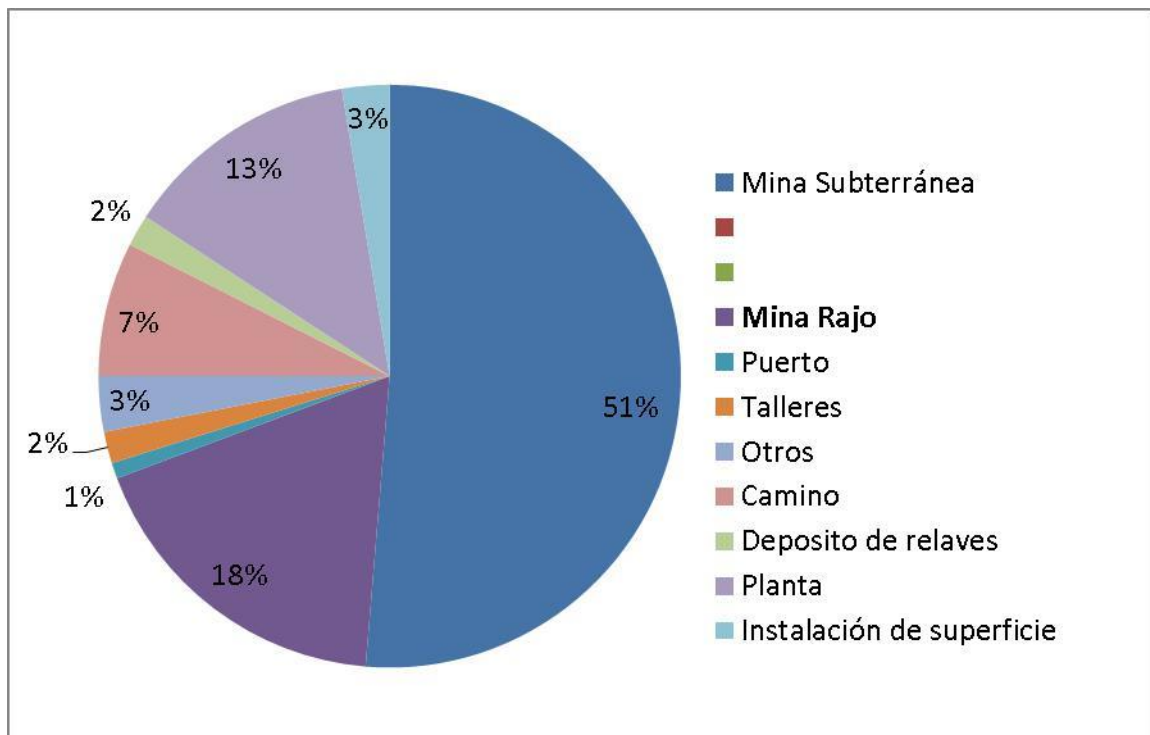
En el caso de Chile los registros del servicio nacional de geología y minería, observados en la Tabla 2, muestran que entre el año 2010 y el año 2019 se registró 41 accidentes fatales en minas rajo, siendo este tipo de faenas mineras las segundas con más accidentes registrados en ese periodo de tiempo.

Tabla 2: Número de accidentes con fatalidades de Chile (2010-2019).

Tipo de instalación	Número de Accidentes
Mina Subterránea	117
Mina Rajo	41
Puerto	2
Talleres	4
Otros	7
Camino	17
Depósito de relaves	4
Planta	30
Instalación de superficie	6
Total	228

Fuente: Servicio de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Gobierno de Chile.

Si bien las faenas mineras subterráneas registraron más del doble de los accidentes que las faenas mineras a cielo abierto, el número de accidentes de estas últimas no deja de ser preocupante al representar un 18% del total (Figura 17), siendo este un porcentaje bastante alto de accidentes fatales.

**Figura 17: Porcentajes de los accidentes fatales Chile 2010-2019.**

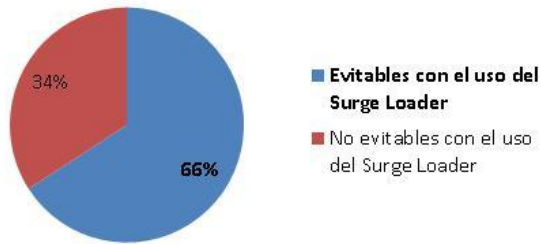
Los diferentes mecanismos que promete el *surge loader* como lo son el cargar el camión sin que este se acerque a la pala o necesite realizar grandes maniobras para acomodarse, como también el control de la carga del material que evitaría *overflow* de los camiones o el transporte de la carga mal equilibrada por la presencia de bolones, generaría un incremento en la seguridad de las operaciones de carguío y transporte de las faenas mineras a cielo abierto, esto se logra demostrar al observar que de los accidentes fatales mencionados anteriormente, en el caso de Perú se evitarían 27 accidentes (Tabla 3), lo cual representa un 66% de los accidentes relacionados al carguío y transporte (Figura 18), en el caso de Chile el uso del *surge loader* hubiese evitado 7 accidentes fatales (Tabla 3), lo que representa el 17% de los accidentes de la mina rajo (Figura 18). Al analizar en conjuntos estos datos el uso del *surge loader* pudo haber evitado alrededor del 3% de los accidentes fatales de cada registro (Perú: 3.21%, Chile: 3.07%), este porcentaje representa accidentes relacionados a volcamientos de camiones en ruta por sobre carga del camión y accidentes ocurridos durante el posicionamiento del camión en punto de descarga de la pala. Por lo que los distintas características ya mencionados que ofrece el *surge loader* si generan una incremento en la seguridad de las operaciones de carguío y transporte.

Tabla 3: Accidentes evitables de ambas muestras.

Accidentes Mina Rajo	Número de Accidentes Perú	Número de Accidentes Chile	
Accidentes de camiones por el <i>overflow</i>	14	4	Evitables con el uso del surge loader
Accidentes por choques del camión y la pala	6	1	
Accidentes en el proceso de descarga de material de la pala al camión	7	2	
No evitables con el uso del Surge Loader	14	34	
Total	41	41	

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Gobierno de Perú y Servicio de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Gobierno de Chile.

**Accidente Carguío y Transporte 2000-2016
(Perú)**



**Accidentes Mina Rajo 2010-2019
(Chile)**

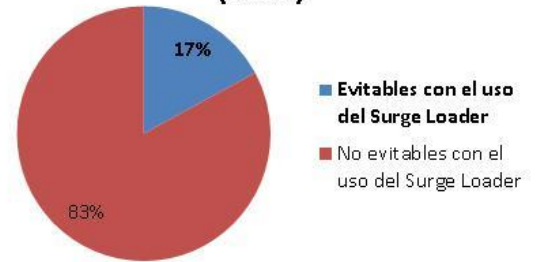


Figura 18: Porcentaje accidentes evitables de ambas muestras.



Capítulo 4: Desarrollo experimental

Al no tener los resultados de las pruebas en terreno del *surge loader* se hace necesario la realización de distintas simulaciones con el objetivo de probar la hipótesis: “el *surge loader* aumenta la productividad del proceso de carguío y transporte”. Para la simulación se emplea el software Arena, que es un software de simulación de eventos discretos que permite describir un proceso con un conjunto de eventos únicos y específicos en el tiempo, lo que permite simular los distintos procesos involucrados en la etapa de carguío y transporte de forma independiente.

4.1 Modelos software Arena

En la minería a cielo a abierto el proceso de carguío y transporte representa aproximadamente el 38% de los costos operacionales como se observa en la Figura 19 [5], por lo que aumentar la eficiencia de este proceso es primordial. El *surge loader* busca generar una nueva dinámica en el proceso de carguío, donde se reduce el tiempo de carguío de material, se aumenta la utilización de la pala y se reduce o elimina el tiempo de maniobra de camión al posicionarse para ser cargado, con esta dinámica se busca aumentar la productividad entre un 15-40%⁵ [21], lo que generaría un aumento de ganancias y por consiguiente un proceso más eficiente.

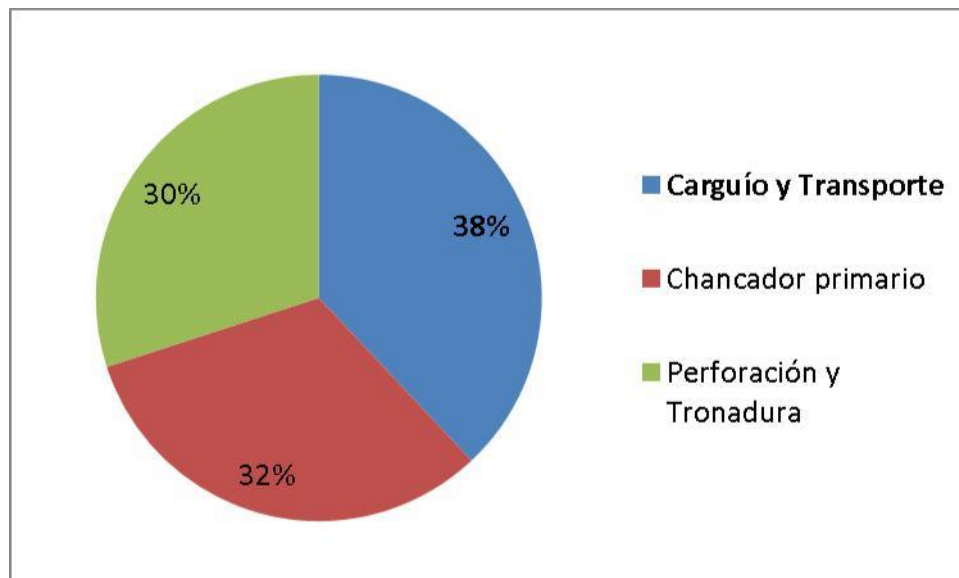


Figura 19: Costos de procesamiento minería cielo abierto. [5]

⁵ Hay que señalar que estos resultados son teóricos, dado que las pruebas del equipo se han retrasado por la contingencia mundial (COVID-19).

Los efectos de la inclusión del *surge loader* al sistema Pala-Camión clásico se estudian mediante simulaciones, las cuales se crean mediante el modelado de eventos discretos que representan el comportamiento del proceso de carguío y transporte como una serie de eventos definidos y ordenados en el tiempo, lo cual permite analizar el proceso durante un periodo de tiempo definido.

Usando los módulos disponibles en este software (los cuales se pueden observar en el Anexo A) se modelan diferentes ciclos que sirven para realizar una comparación y de punto de control. Las simulaciones trabajan en un periodo de tiempo de 8 horas continuas, estas horas de trabajo consideran una disponibilidad del 100% de los distintos equipos, además de eliminar el factor de accidentabilidad de la faena. Los modelos de simulación se trabajan en base los diferentes tiempos de los procesos con una distribución triangular (Anexo B).

4.2 Modelo ciclo de trabajo de la pala

El primer modelo que se observa en la Figura 20, busca simular el ciclo de la pala, el modelo consiste en dividir el ciclo de la pala en sus diferentes procesos (carga de material, movimiento o giro al punto de descarga, descarga y movimiento o giro al punto de carga), cada uno con una distribución de tiempo triangular, el objetivo principal es obtener la productividad máxima que logra la pala al trabajar de forma continua estableciendo una utilización del 100%.

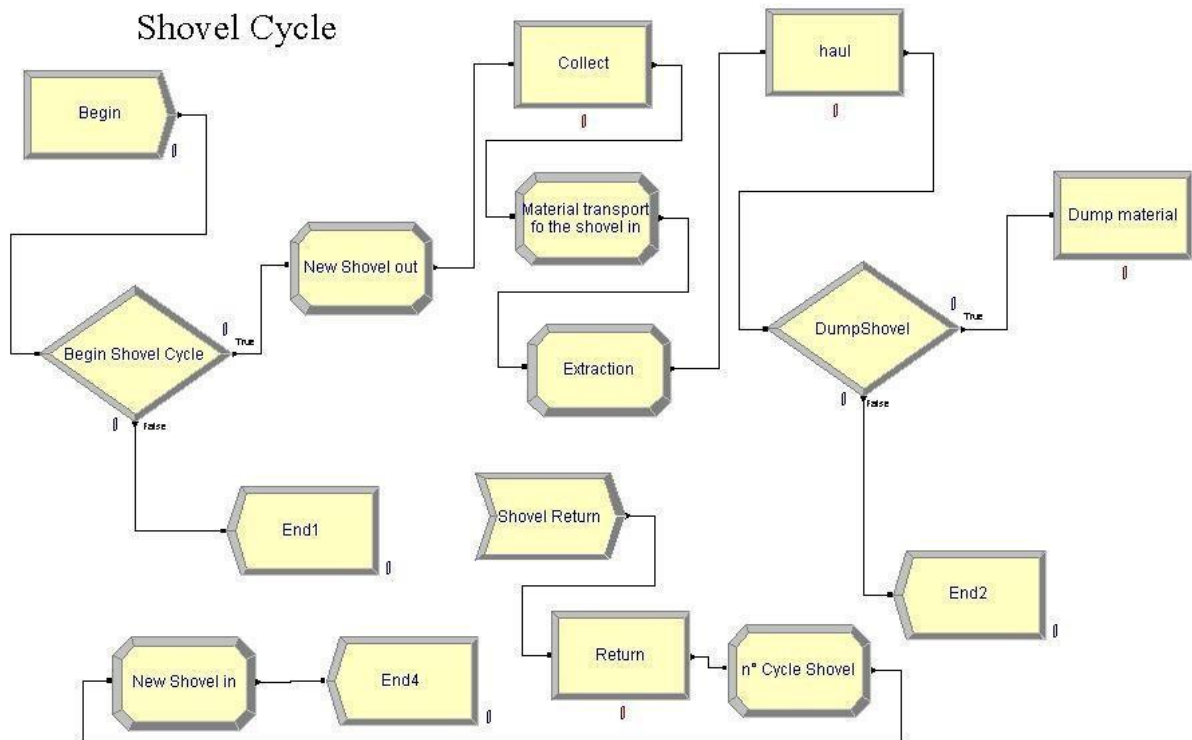


Figura 20: Modelo de simulación software Arena de ciclo de la pala.

4.3 Modelo sistema Pala-Camión clásico

El segundo modelo junta el modelo presentado anterior mente (Figura 20) con el ciclo de la pala el cual se puede apreciar en la Figura 21, tiene como objetivo simular el ciclo del sistema Pala-Camión clásico, este modelo se compone de dos ciclos tanto el de la pala como el del camión, cada ciclo se compone de sus diferentes procesos (en el caso de la pala: carga de material, movimiento o giro al punto de descarga, descarga y movimiento o giro al punto de carga y en el caso del camión: maniobras para cargar, carga, maniobra de salida del punto de carga, transporte del material, maniobras para descargar, descarga, maniobras de salida del punto de carga y regreso), todos los procesos tienen una distribución de tiempo triangular, además ambos ciclos son mutuamente dependientes el uno del otro, dado que la pala no puede descargar si no hay un camión y el camión debe esperar a que la pala lo cargue. Este modelo pretende obtener como resultado la productividad del sistema Pala-Camión clásico.

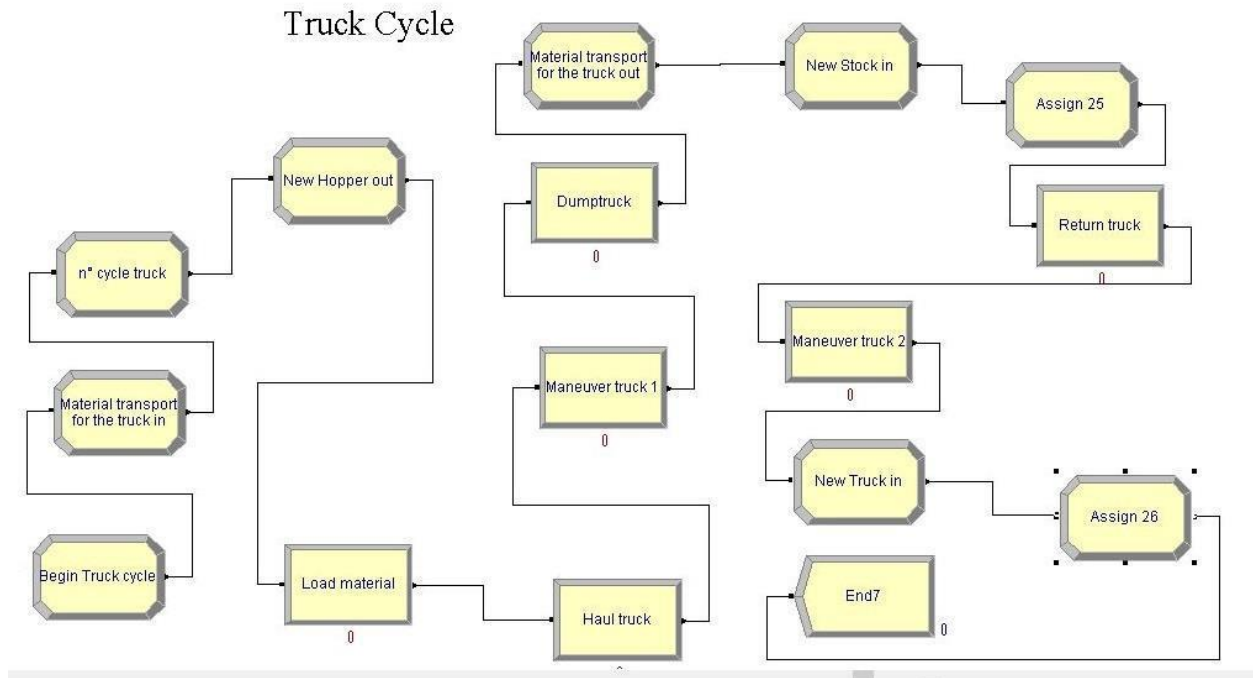


Figura 21: Modelo de simulación software Arena del ciclo Camión.

4.4 Modelo sistema Pala-Camión con la incorporación del surge loader.

El tercer y último modelo busca simular el sistema Pala-Camión con la inclusión del ciclo del surge loader (Figura 22), este modelo se divide en tres ciclos el de la pala, el del camión y el del surge loader, este último ciclo se divide en sus propios procesos (recepción de material y descarga de material) cada uno con distribuciones triangulares, los procesos de la pala y el camión son los mismos que los del modelo anterior (Figura 20 y Figura 21), pero a diferencia del anterior ambos ciclos no se relacionan entre ellos, sino que se relacionan con el surge loader, la pala solo puede descargar el material si el *surge loader* tiene capacidad de recibir el material y el camión solo debe esperar a que el *surge loader* lo cargue para continuar su ciclo, dado que el punto de carga del camión está dentro de su ruta lo que evita que el camión tenga que realizar maniobras para ubicarse en el punto de carga reduciendo de forma considerable el tiempo de maniobra. Con este modelo se busca obtener los valores de la productividad del proceso de carguío y transporte con la inclusión del surge loader.

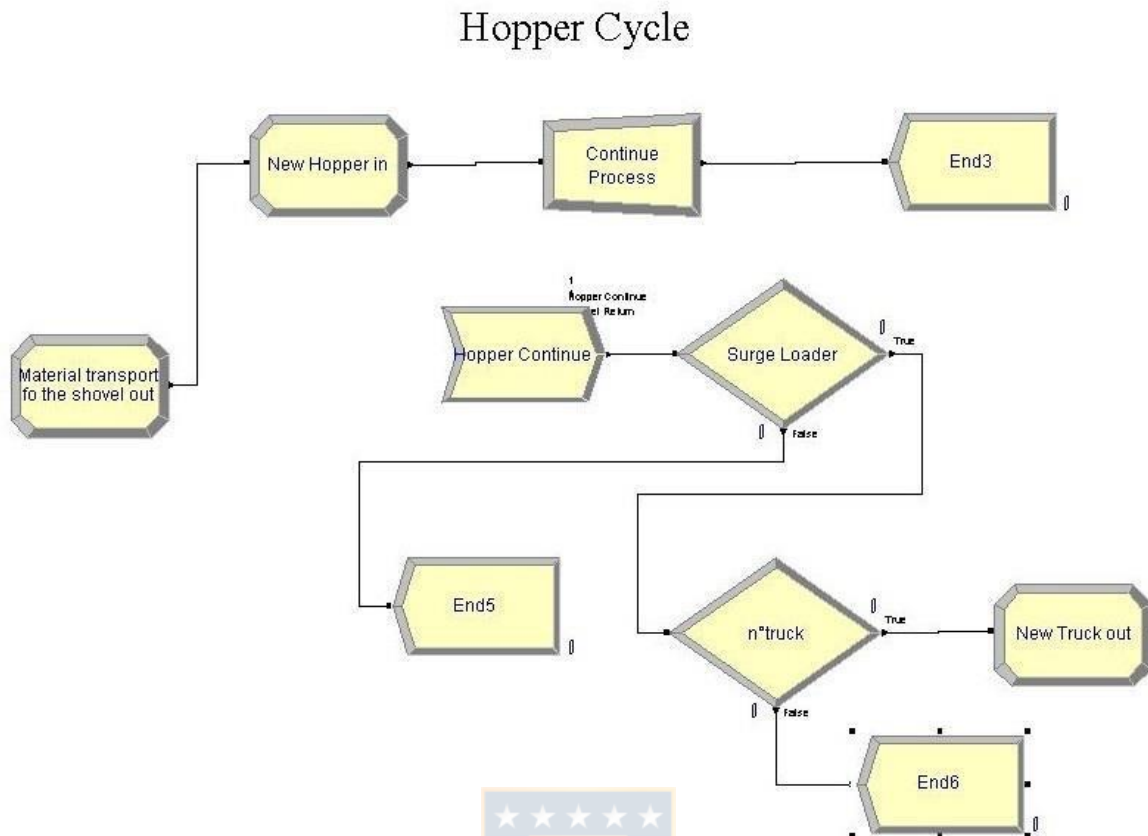


Figura 22: Modelo de simulación software Arena del ciclo del Surge Loader.

4.5 Capacidad del surge loader

Para definir la capacidad propia de *surge loader* se hicieron diferentes simulaciones de los modelos de carguío y transporte con y sin *surge loader* (Figura 21 y Figura 22). La comparación entre resultados muestra que la relación entre la capacidad del *surge loader* y la disminución del número de camiones en la faena no cambia al aumentar la capacidad del *surge loader* a más de 2.5 la capacidad del camión como se aprecia en la Figura 23, por lo que en el tercer modelo (Figura 22) se considera que la capacidad del *surge loader* es 2.5 veces la capacidad del camión, para trabajar con la capacidad que logra la máxima eficiencia del *surge loader*. Se debe señalar que el estudio de la capacidad del *surge loader* (Figura 23) se hizo considerando que la capacidad siempre es menor que la capacidad del camión, por lo que la pala no tiene injerencia en la capacidad del *surge loader*.

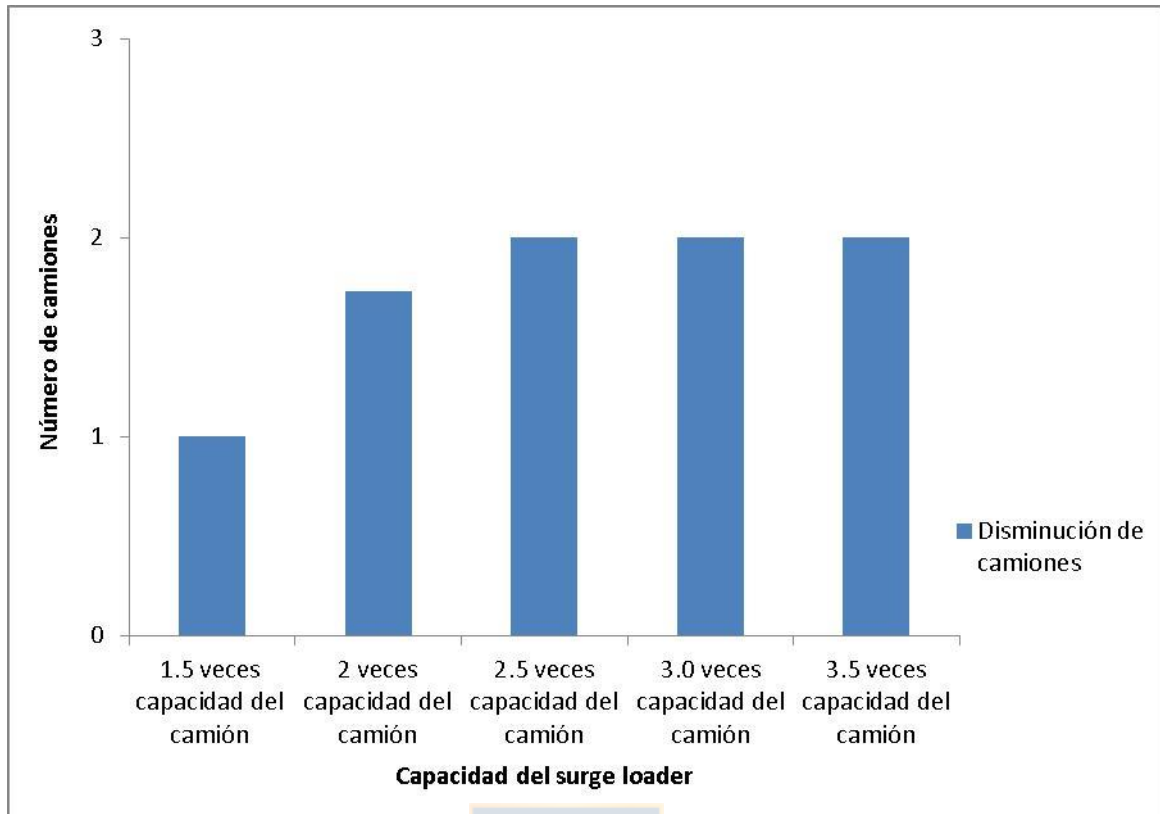


Figura 23: Relación entre capacidad del *surge loader* y disminución de camiones.

4.6 Evaluación efecto del *surge loader* en la productividad

Se tomaron seis casos de estudios (A, B, C, D, E, F) para observar el efecto que tendría el *surge* en cada uno de ellos, la información de cada caso de estudio se obtuvo de los procesos de carguío y transporte de diferentes minas⁶, por lo que cada caso de estudio posee características particulares de cada faena (distancias, tiempos), además de usar diferentes combinaciones de palas y camiones, esto se aprecia en el Anexo C⁷, se puede apreciar una descripción de cada caso en la Tabla 4.

⁶ La información se considera de índole privada, por lo que no se mencionara el nombre de las mineras a la cual corresponde cada caso.

⁷ Como todavía no hay resultados oficiales (solo teóricos) del incremento del fill factor que proporciona el *surge loader*, se decide utilizar el fill factor del camión en el sistema Pala-Camión clásico en ambas situaciones.

Tabla 4: Descripción casos simulados

Caso	Distancia entre puntos de carga y descarga de material (m)	Pases de la pala para cargar el camión
A	8200	4
B	7100	4
C	8875	5
D	6450	5
E	7300	4
F	5050	4

Las únicas similitudes entre los casos de estudios son que se trabaja bajo el supuesto de que las operaciones son automatizadas, con el fin de eliminar el error humano⁸ de la operación de carguío y transporte, la otra similitud es el esquema de transporte que utilizan, estos se pueden ver en la Figura 24 y en la Figura 25. El esquema se basa en un método “indexing” de doble vía, esto se hizo para evitar puntos de encuentro de los camiones en su trayecto que generen un aumento en el tiempo de ciclo de los camiones, el tipo de carga es un “sistema de carga unilateral”, dado que este es uno de los más comunes en minería cielo abierto [5]. Se simplifico al uso de un solo esquema de trabajo por tipo de circuito (sistema Pala-Camión clásico y sistema Pala-Camión con la incorporación del surge loader) para poder obtener resultados de los diferentes casos en igualdad de condiciones y así poder generar una comparación entre ellos.

⁸ Si bien un proceso automatizado también posee un porcentaje de error, este se consideró cero para facilitar la simulación.

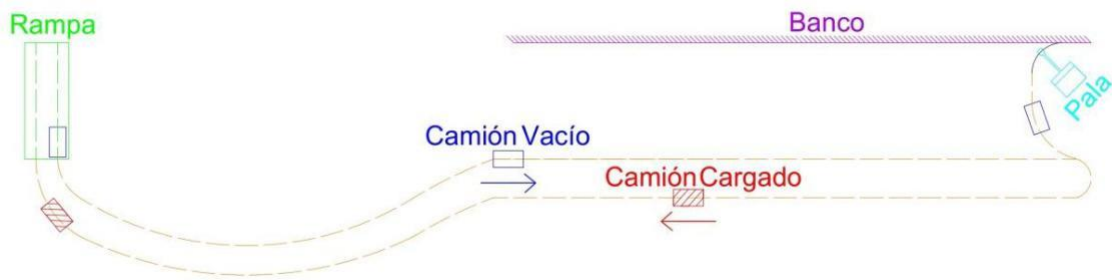


Figura 24: Esquema situación sistema Pala-Camión clásica.

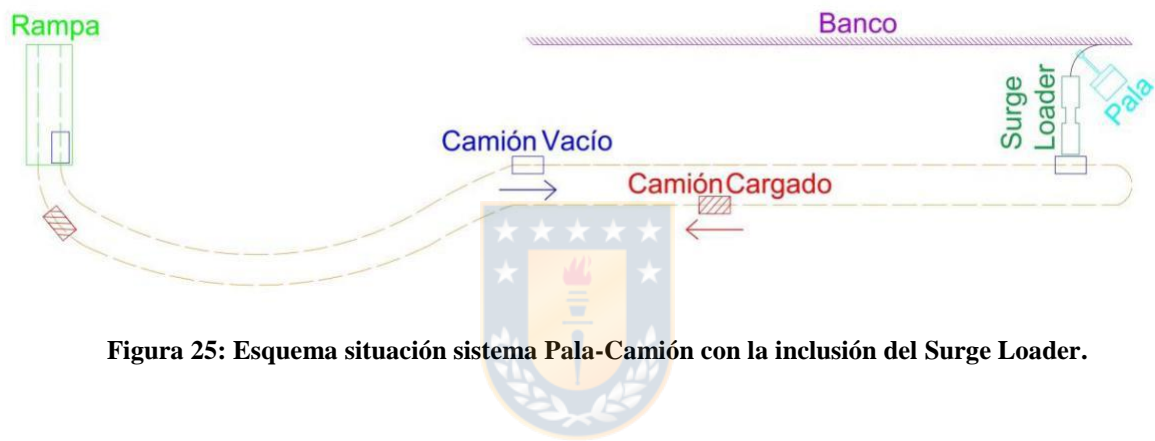


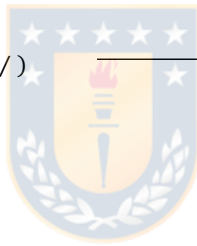
Figura 25: Esquema situación sistema Pala-Camión con la inclusión del Surge Loader.

Capítulo 5: Resultados simulación

Con las simulaciones realizadas se obtuvieron diferentes datos los cuales se aprecian en el Anexo D, estos se pueden clasificar en tres tipos, el primer tipo son los datos obtenidos cuando la pala trabaja las 8 horas de forma continua, el segundo tipo son los datos obtenidos bajo el sistema Pala-Camión clásico, en este tipo de datos la cantidad de camiones varia hasta alcanzar la productividad máxima del sistema, el ultimo tipo de datos son los datos del sistema Pala-Camión con la inclusión de *surge loader*, en este tipo solo se trabaja con la cantidad de camiones necesarios para alcanzar la productividad máxima que alcanza el sistema. Finalmente de los datos se extrae la productividad de los camiones, utilizando la Ecuación 2, la productividad de la pala utilizando la Ecuación 3 y la utilización de la pala considerando la Ecuación 4.

Ecuación 2: Productividad de camiones. (/) _____

Ecuación 3: Productividad pala. (/) _____



Ecuación 4: Utilización pala.

9

⁹Es la cantidad de material extraído cuando la pala trabaja las 8 horas de forma continua estos valores se observa en el Anexo D.

5.1 Utilización pala

La utilización obtenida por la pala en cada caso en los dos diferentes escenarios (sistema Pala-Camión clásico y sistema Pala-Camión con el *surge loader*) se observa a continuación en la Figura 26.

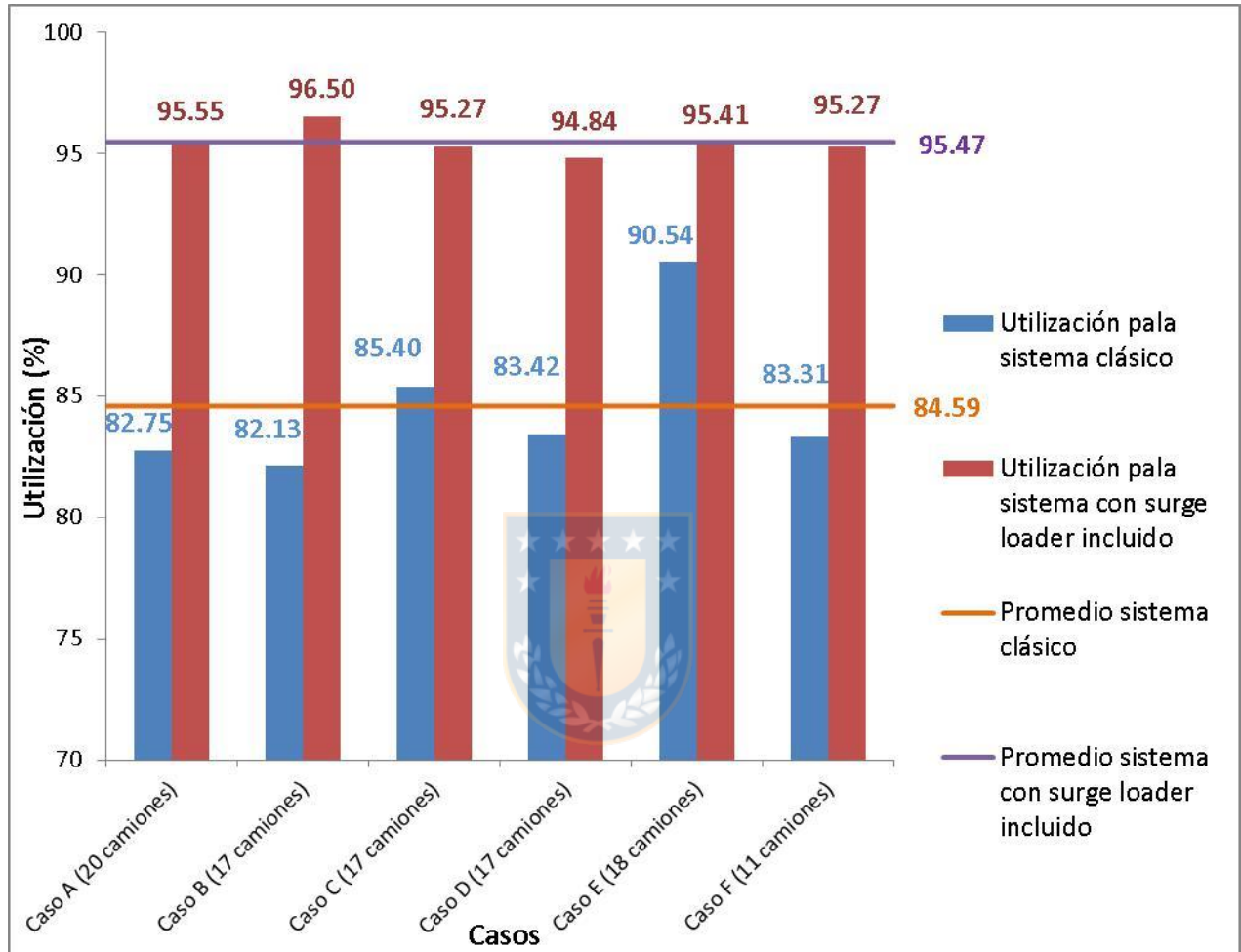


Figura 26: Utilización pala.

La Figura 26 muestra que en todos los casos la pala en el sistema con el *surge loader* incluido alcanza una mayor utilización, la pala con el sistema clásico alcanza una utilización promedio del 84.59 % mientras que con el sistema con el *surge loader* incluido la pala alcanza una utilización del 95.47 %, es muy positivo porque quiere decir que la pala trabaja casi la totalidad de las 8 horas, también hay que señalar que el *surge loader* logra mejorar la utilización incluso en el caso E donde la pala registra una alta utilización con el sistema clásico (90.54 %).

5.2 Productividad pala

La Figura 27 muestra los resultados de la productividad obtenida por la pala en cada caso en los dos diferentes escenarios (sistema Pala-Camión clásico y sistema Pala-Camión con el *surge loader*).

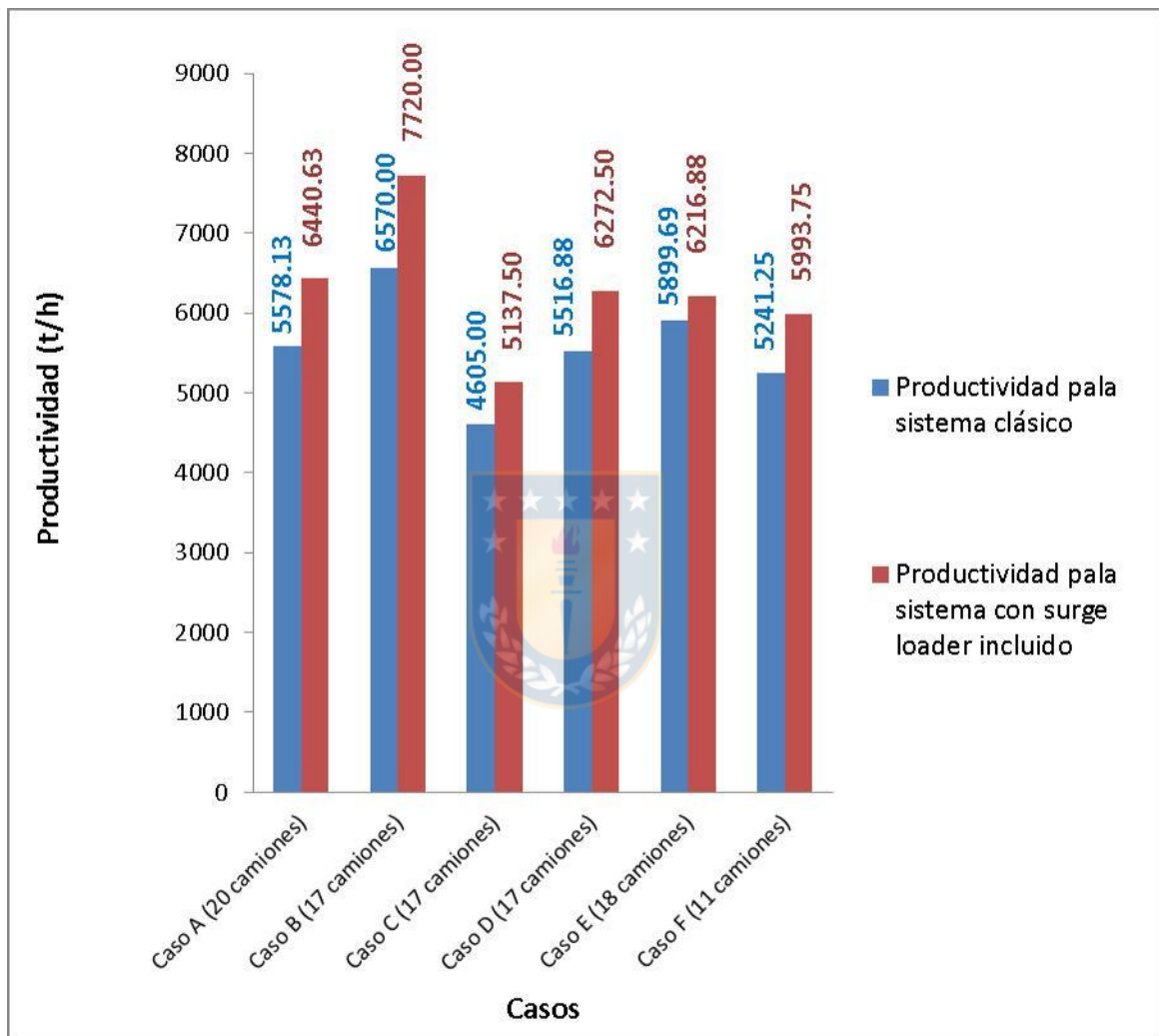


Figura 27: Productividad Pala.

La Figura 27 muestra que al finalizar las 8 horas de simulación el sistema con el *surge loader* logra mejores resultados en todos los casos, sin embargo el aumento en la productividad no fue constante entre los casos. El caso que muestra un menor aumento es el caso E, esto guarda relación con la utilización mostrada en la Figura 26, en el resto de los casos el aumento en la productividad logrado por el sistema con el *surge loader* incluido es bastante alto.

La Figura 28 muestra la productividad máxima que alcanza la pala en todos los casos en los dos escenarios.

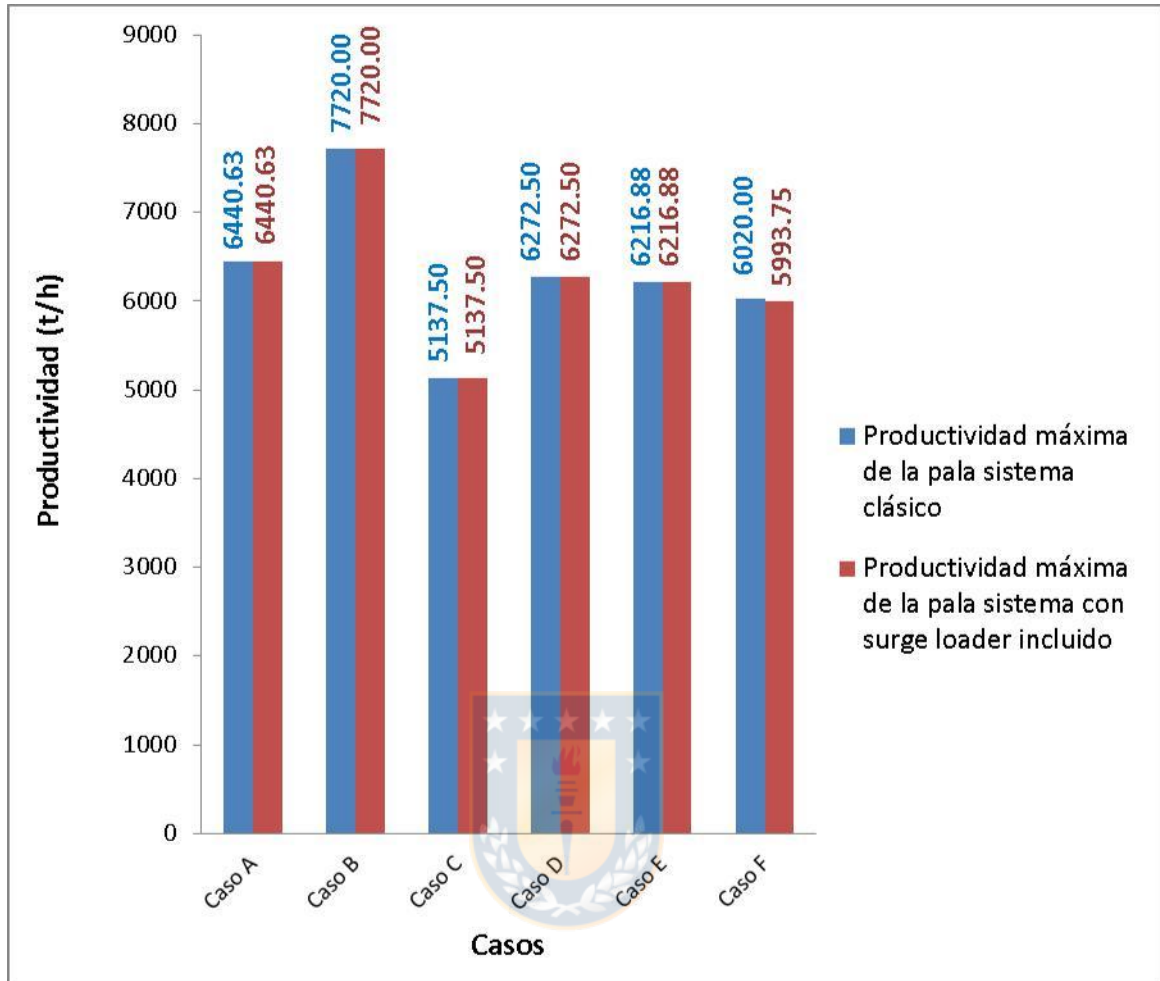


Figura 28: Productividad máxima de la pala.

En la Figura 28 se aprecia que la pala alcanza la misma productividad máxima en 5 de los 6 casos, en el único caso donde la productividad máxima del sistema clásico supera al sistema con el *surge loader* es el caso F, esta diferencia es de 26.25 toneladas por hora. Se debe señalar que el sistema clásico siempre necesito agregar camiones a la flota para alcanzar los valores de productividad obtenidos por el sistema con el *surge loader* siendo la mayoría de los casos agregar dos camiones a la flota, solo el caso C y F necesitaron menos, en el caso C solo se necesitó de un camión y en el caso F el sistema clásico necesito de dos camiones para que la pala alcanzara su productividad máxima, pero solo 1.86 camiones para alcanzar los resultados obtenidos por el sistema con el *surge loader* incluido.

5.3 Productividad camiones

La Figura 29 muestra los resultados de la productividad obtenida por los camiones en cada caso en los dos diferentes escenarios (sistema Pala-Camión clásico y sistema Pala-Camión con el *surge loader*).

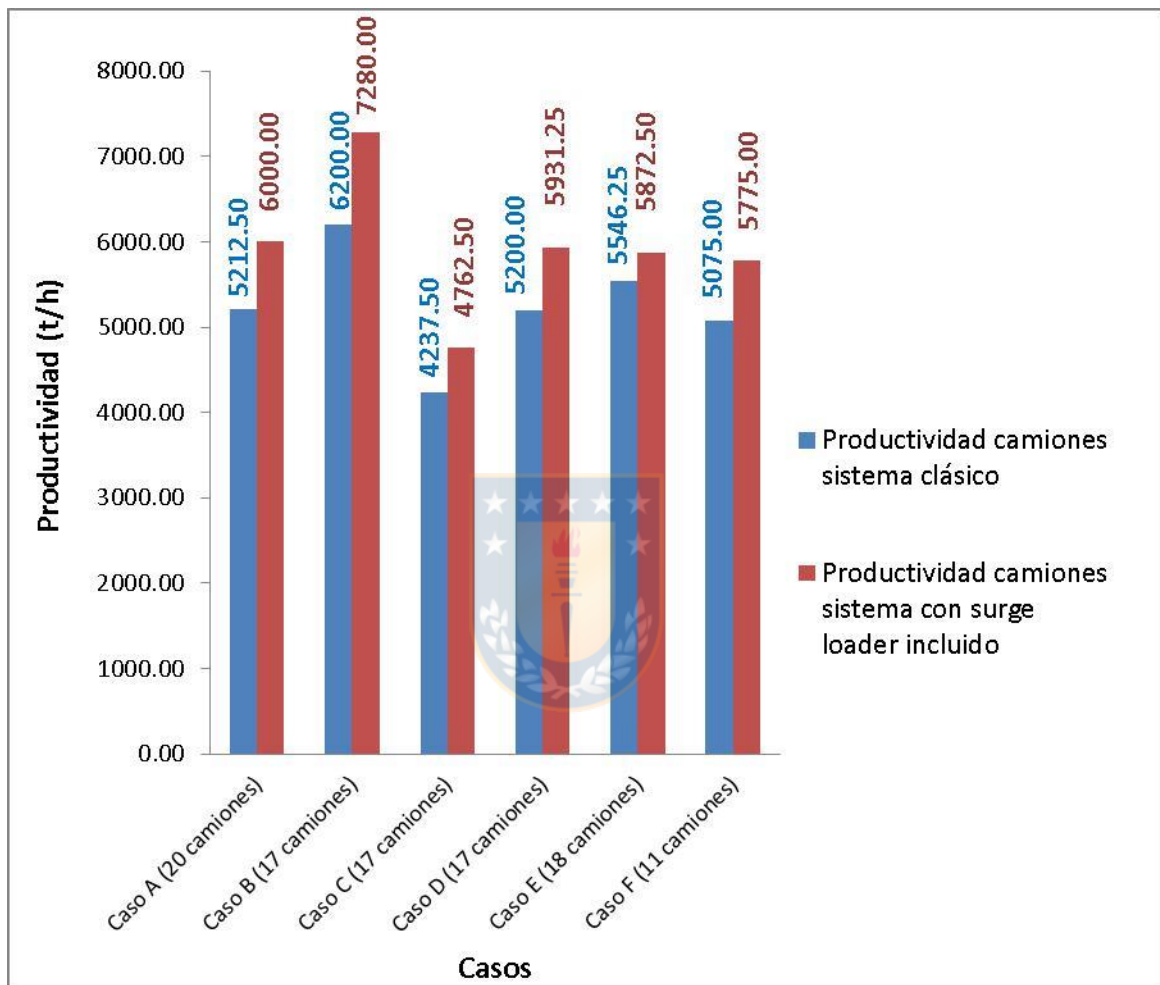


Figura 29: Productividad camiones.

En la Figura 29 se aprecia que al igual que lo ocurrido con la pala (Figura 27) el sistema con el *surge loader* incluido logra que la productividad de los camiones se ha mayor que la alcanzada con el sistema clásico, también se observa que el caso E es el caso que registra el menor aumento de los seis casos repitiendo lo mostrado en la productividad de las palas, esto se debe a que en la etapa de carguío y transporte la productividad de la pala y el camión van directamente relacionadas.

En la Figura 30 se aprecia la productividad máxima que alcanza los camiones en todos los casos en los dos escenarios.

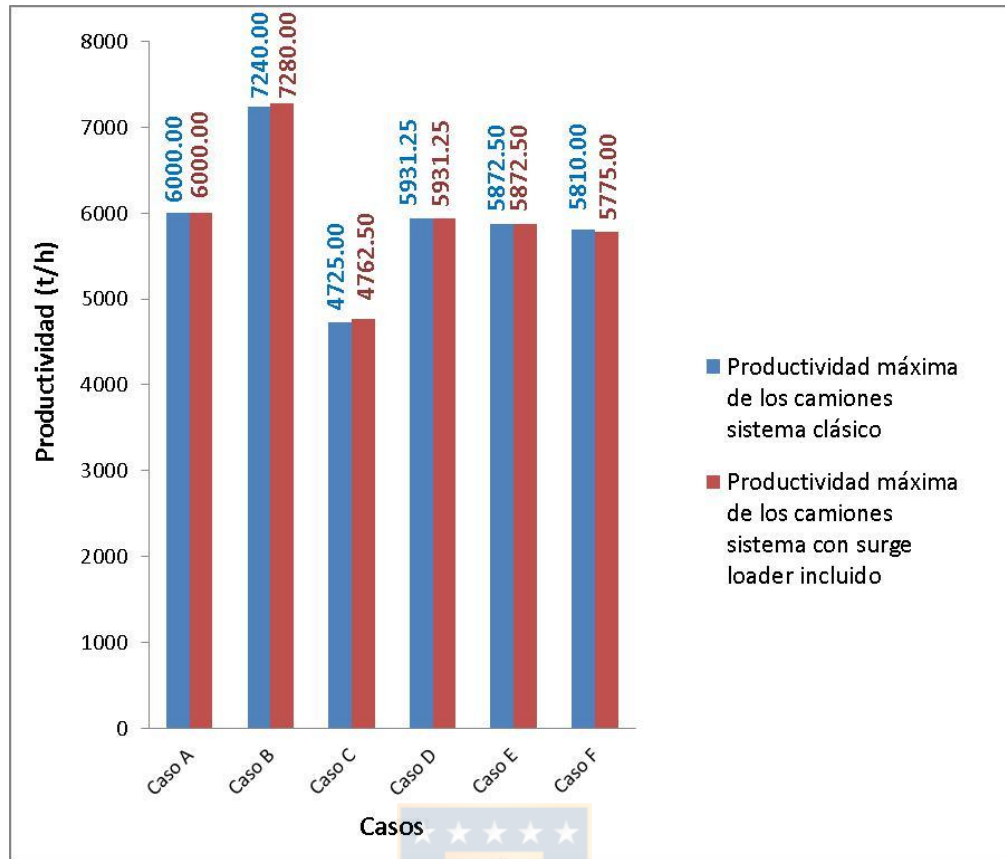


Figura 30: Productividad máximo de los camiones.

La Figura 30 muestra que la productividad máxima de los camiones con el sistema con el *surge loader* incluido es igual a la productividad máxima de los camiones con el sistema clásico en 3 de los 6 casos, hay que señalar que para alcanzar la productividad máxima el sistema clásico necesito agregar dos camiones a la flota en 5 de los 6, siendo el caso C el único que necesitó agregar un solo camión para alcanzar la productividad máxima bajo el sistema clásico. En el caso B y C la productividad máximo de los camiones con el sistema con el *surge loader* incluido es mayor que la productividad máxima alcanzada con el sistema clásico, esto se debe a que el sistema clásico al agregar más camiones a la flota aumente el tiempo de espera de estos y en estos dos casos en particular (caso B y C) este aumento en el tiempo de espera repercute en la imposibilidad de completar el mismo número de ciclos que el sistema con el *surge loader* incluido. En el caso F la productividad máxima de los camiones con el sistema clásico es mayor, en ese caso al trabajar en un circuito de menor distancia el impacto de ingresar un camión es mayor, por lo que los camiones alcanzan a completar más ciclos a pesar del aumento en el tiempo de espera, por esta razón el *surge loader* no puede equiparar los resultados del sistema Pala-Camión clásico.

Capítulo 6: Análisis

6.1 Análisis utilización pala

Al observar los resultados del incremento de la utilización (Figura 26) se aprecia que el *surge loader* logro aumentar la utilización de la pala haciendo que esta pasara de valores en cercanos al 80 % (en 5 de los 6 casos) a valores cercanos al 95 %, este aumento implica una disminución de los tiempos “muertos”¹⁰ del equipo, al disminuir esto tiempo se maximizar la eficiencia de la pala en la etapa de carguío, lo cual se termina reflejando en los costos de cargar el material.

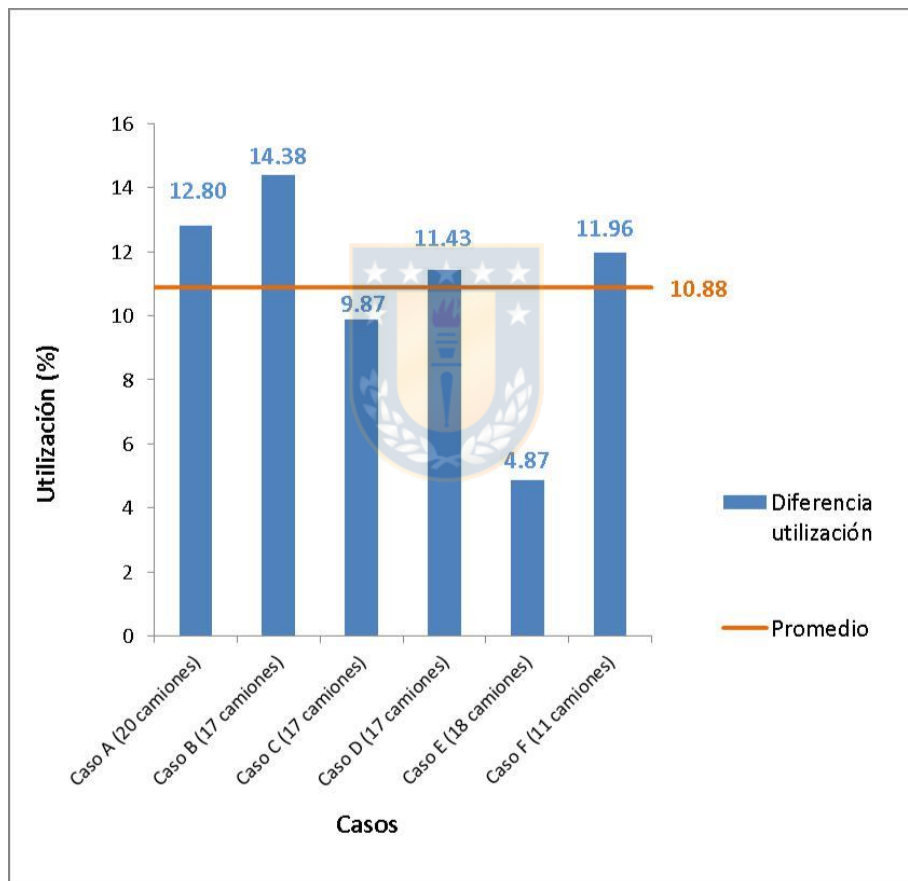


Figura 31: Porcentaje incremento utilización de la pala.

Como se aprecia en la Figura 31 el aumento promedio de la utilización de la pala es del 11 %, además se aprecia el impacto que tiene el *surge loader* en los casos donde la pala cuenta con una utilización poco optima generando incrementos de hasta un 14 % en la utilización, esto

¹⁰ Tiempos “muertos” es un término utilizado para referirse a tiempos de inactividad de un equipo en los cuales el equipo no realiza ninguna tarea productiva.

demuestra que el *surge loader* es un equipo perfecto para optimizar la eficiencia del proceso de carguío.

6.2 Análisis productividad pala

Observando los datos de la productividad de la pala que se observan en la Figura 27, lo primero que hay que destacar es que la inclusión del *surge loader* incrementa la productividad de la pala en todos los caso, este incremento en promedio es de un 13 %, como se muestra en la Figura 32, este porcentaje podría aumentar si se trabajara en procesos no automatizados, al entrar en las simulaciones el error humano, no obstante el porcentaje obtenido no deja de ser positivo, al mostrar un aumento importante en la productividad. En todos los caso el sistema Pala-Camión clásico para alcanzar o superar la productividad máxima del sistema con el *surge loader* incluido debió aumentar el número de camiones, lo que reduce los tiempos de espera de la pala, pero aumenta los tiempos de espera de los camiones.

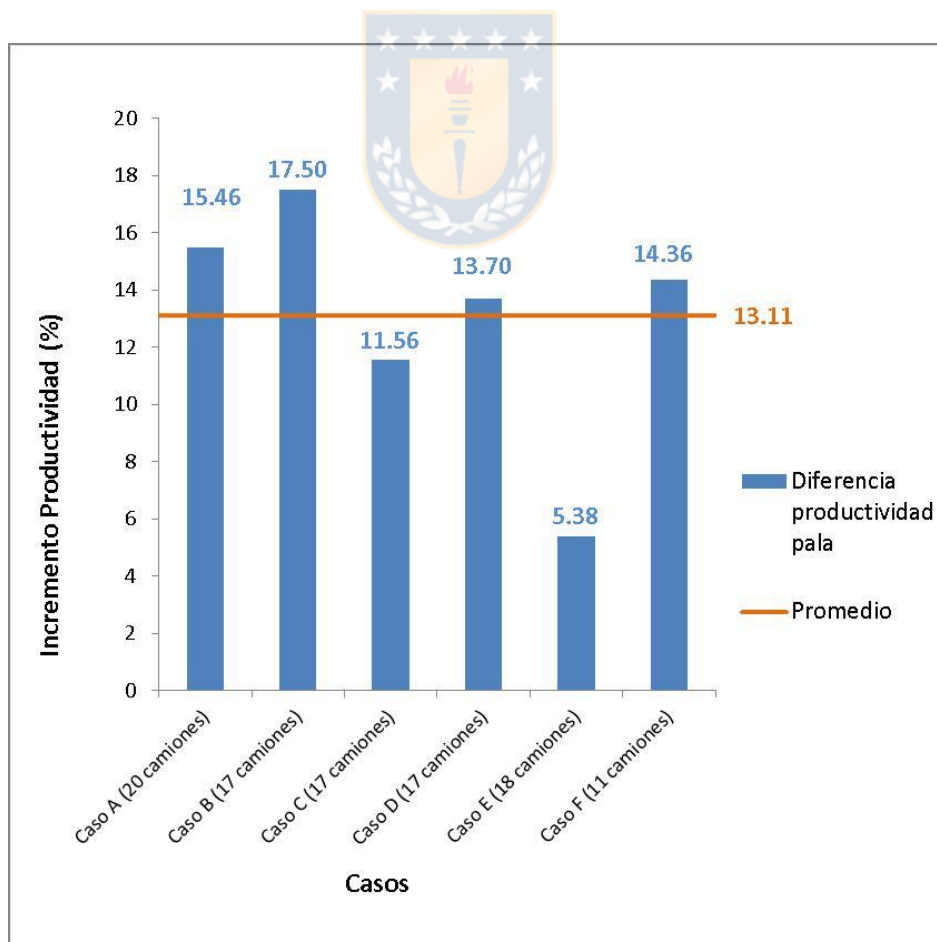


Figura 32: Porcentaje de incremento en la productividad de la pala.

Como se aprecia en la Figura 32 el incremento en la productividad de la pala logrado gracias al *surge loader* es superior al 10 % en 5 de los 6 casos, si se deja de lado el caso con un incremento de la productividad menor al 10 % (caso E) el incremento promedio de la productividad de la pala es de un 15 %. Los resultados presentados en la Figura 31 y la Figura 32 muestran que indudablemente el *surge loader* mejora la productividad y la eficiencia de la pala.

6.3 Análisis de la productividad camiones

Al prestar atención a los datos de la productividad de la camiones que se observan en la Figura 29, destaca que al igual que la pala, la productividad de los camiones aumenta, este incremento al igual que en la pala en promedio es del 13%, esto se aprecia en la Figura 33, este aumento guarda relación con que en el proceso de carguío y transporte aun con la inclusión del *surge loader* los procesos de la pala y el camión están relacionados, si uno aumenta el otro debe aumentar también.

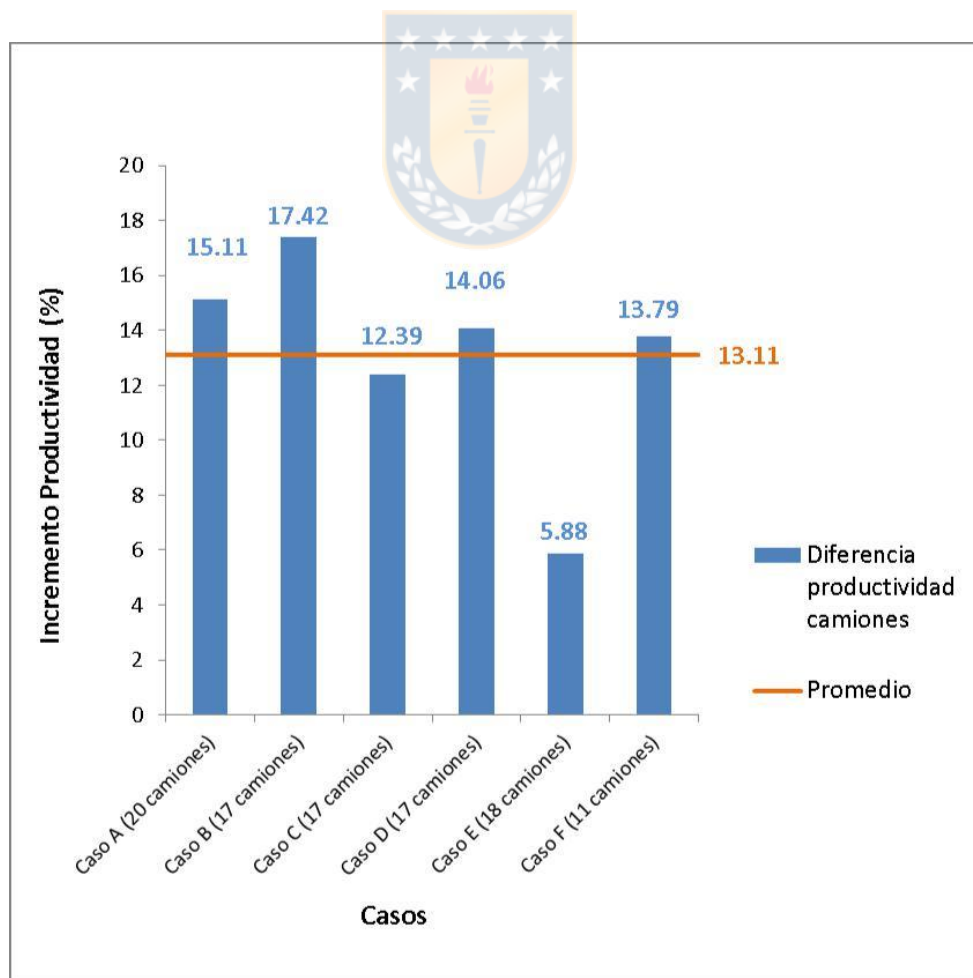


Figura 33: Porcentaje de incremento en la productividad de los camiones.

El incremento observado en la Figura 33 muestra que el *surge loader* no solo ayudo a incrementar la productividad de la pala, sino que además ayudo a incrementar la productividad de los camiones, esto demuestra que al reducir los tiempos de maniobrabilidad y reducir los tiempos de carga del camión sin aumentar los tiempos de espera el *surge loader* logra generar un proceso de transporte de material mucho más eficiente, esto sumado a los resultados mostrados en la productividad de la pala demuestran que incluir el *surge loader* en el sistema Pala-Camión aumenta la productividad y eficiencia de la etapa de carguío y transporte en minas a cielo abierto.

6.4 Análisis tiempo de ciclo de los camiones

En la Tabla 5 se aprecia el tiempo promedio de ciclo del camión como también su tiempo de espera máximo.

Tabla 5: Tiempos de ciclo y espera de los camiones en ambos sistemas.

Casos	<i>Surge loader</i> no incorporado		<i>Surge loader</i> incorporado	
	Tiempo de ciclo promedio (min)	Tiempo máximo de espera (min)	Tiempo de ciclo promedio (min)	Tiempo máximo de espera (min)
A	48.77	7.50	47.92	1.60
B	34.65	8.66	34.14	1.75
C	53.04	6.00	51.69	3.20
D	40.31	10.33	39.39	4.81
E	41.23	10.00	40.39	3.08
F	23.15	6.50	22.63	1.47

Al analizar los tiempos que se muestran en la Tabla 5, se observa que el tiempo de ciclo de los camiones en los 6 casos no se reduce de forma significativa, siendo el tiempo de ciclo de los camiones en los sistemas con el *surge loader* incluido un 2 % menor (alrededor de 50 segundos promedio), esto guarda relación a que el tiempo de ciclo del camión se compone en gran medida al tiempo de viaje de ida al punto de descarga y de vuelta al punto de carga, por lo que los tiempos que el *surge loader* reduce o elimina no son muy significativos al observarlos en el global. Al comparar el tiempo de espera máximo¹¹ de los camiones se observan que el sistema Pala-Camión con el *surge loader* incluido logra disminuir de forma significativa los tiempos de

¹¹ El tiempo de espera de los camiones varia durante las 8 horas de simulación, pudiendo ser menor pero no mayor al registrado en la Tabla 5.

espera del camión, como se aprecia en la Figura 34 en cuatro de los seis casos el sistema con el *surge loader* incluido logra reducir el tiempo de espera de los camiones en más 66.66 %, esto representa una gran ventaja dado que se reduce el tiempo de inutilización de los camiones. En el caso C donde el sistema clásico alcanza los resultados del *surge loader* con tan solo un camión se observa que esto guarda relación con la poca reducción del tiempo de espera máximo que logra el *surge loader*, esta reducción es menor porque el sistema clásico por sus características tiene un bajo tiempo de espera máximo.

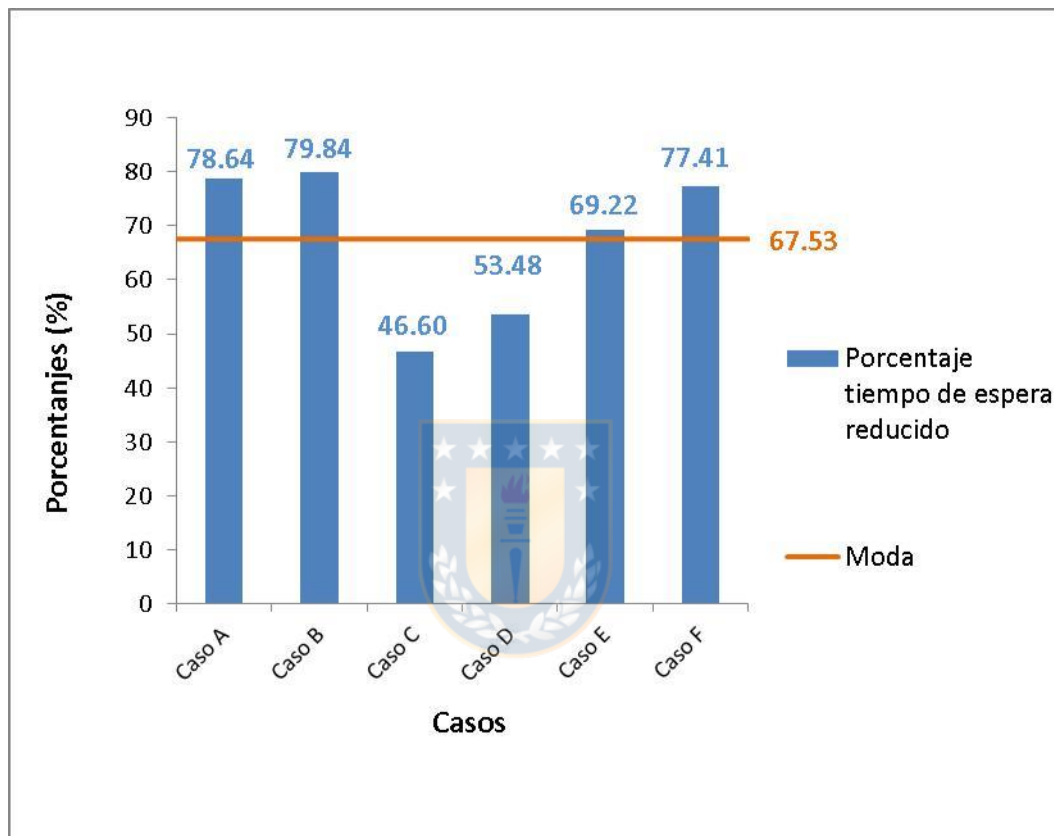


Figura 34: Reducción porcentual de tiempos de espera del camión.

Finalmente, al comparar ambos sistemas la inclusión del *surge loader* permite aumentar la productividad general, este aumento representa la inclusión de dos camiones en la mayoría de los casos, solo en dos casos este número disminuye como se aprecia en la Figura 35. De estos dos casos el más crítico es el caso C que muestra que la inclusión del *surge loader* al sistema solo equivale a la incorporación de un camión como se aprecia en la Figura 34, esto se debe a que en este caso la incorporación de un camión al sistema Pala-Camión clásico aumenta la productividad, pero no aumenta el tiempo de espera de los camiones a diferencia de los otros casos. El tiempo de espera no aumenta de forma significativa debido a que las mayores distancias hacen menos probable que los camiones se encuentren en el punto de carga.

6.5 Análisis reducción de camiones

En la Figura 35 se aprecia cuantos camiones necesita el sistema Pala-Camión clásico para obtener los mismos resultados que el sistema con el *surge loader* incluido.

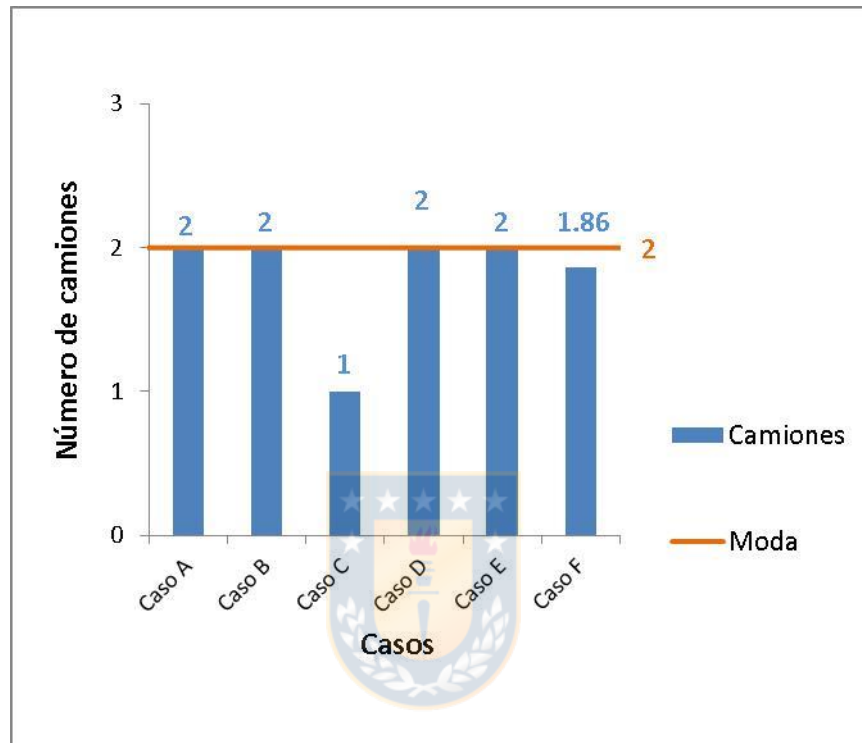


Figura 35: Reducción de camiones en el sistema al incluir el surge loader.

La inclusión del *surge loader* muestra un gran impacto en la mayoría de los casos, en cuatro de los 6 casos la inclusión *surge loader* permite alcanzar la productividad máxima del proceso de carguío y transporte con dos camiones menos como se aprecia en la Figura 35, esto generaría distintos beneficios como reducir el impacto en el ambiente generado por la flota de camiones, reducir el costo por tonelada, además de reducir el capital humano, los costos capitales y operacionales que conlleva tener estos dos equipos en la faena.

Capítulo 7: Impacto económico

Con los resultados observado en las simulaciones se puede decir que la incorporación del *surge loader* disminuye el número de camiones en el sistema Pala-Camión, considerando una disminución de dos camiones se observa en la Tabla 6 que si bien el costo capital del *surge loader* es significativamente mayor al de un camión, al comparar este costo con el costo capital de dos camiones se equipara, si bien sigue siendo menor el costo de adquirir dos camiones la diferencia es mucho menor, al ver los costos operacionales sucede algo similar, en principio el costo operacional del *surge loader* es mayor al costo operacional de un camión, al comparar el costo operacional del *surge loader* con el costo operacional de dos camiones este representa un 65.73 % de ese costo.

Tabla 6: Costos de los equipos¹².

	Camiones	Surge Loader
Número de equipos	2	1
Costo Capital (US dólar)	\$5,000,000	\$11,000,000
Costo Capital Total (US dólar)	\$10,000,000	\$11,000,000
Costo Operacional (US dólar/hora)	\$729	\$554
Costo Operacional Total (US dólar/hora)	\$1,459	\$554
Tasa (%)	20%	20%
Periodo (años)	1	1
VAC (US dólar)	\$20,650,136.70	\$15,047,286.32

¹² Los costos no son costos oficiales, son solo costos teóricos obtenidos de bibliografía [28] y actualizados según inflación.

Los valores actuales de costos mostrados en la Tabla 6 muestran que en un periodo de un año bajo la misma tasa el implementar un *surge loader* es una mejor opción que implementar dos camiones.

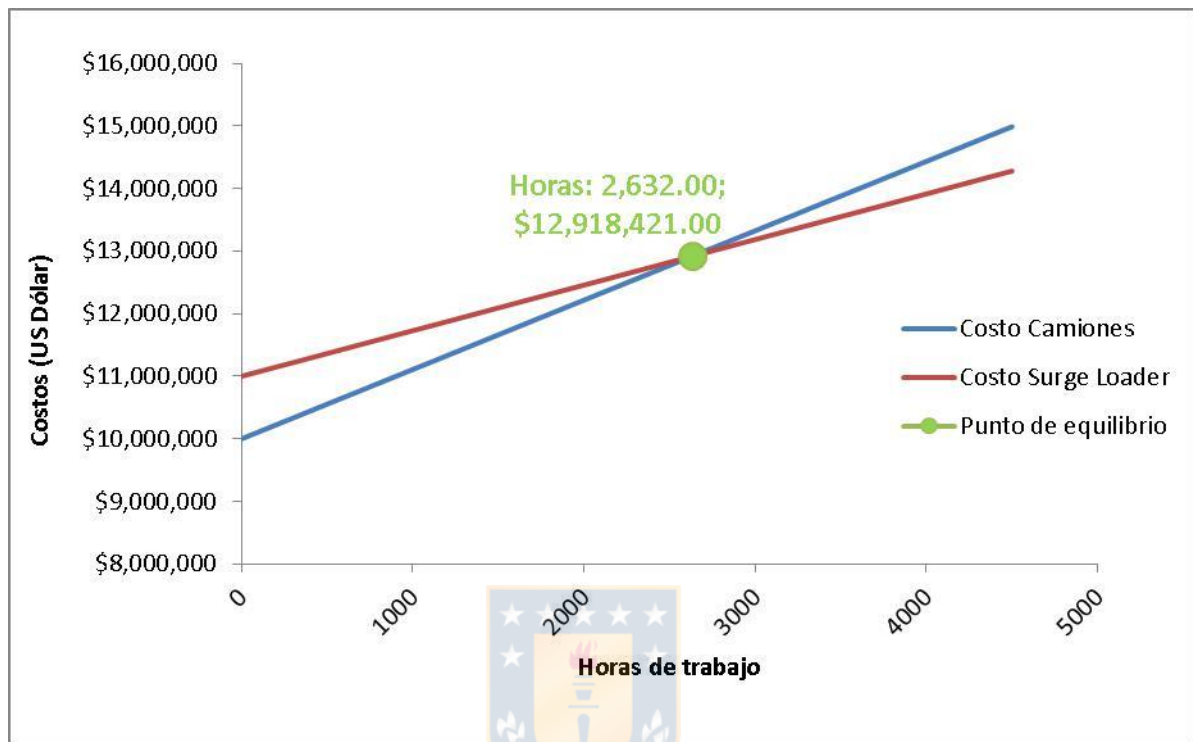


Figura 36: Proyección de los costos de los equipos.

Se puede observar en la Figura 36 que en términos económicos el *surge loader* es una mejor opción, al equiparar los costos globales (costo capital y costo operacional) luego de 2632 horas de trabajo¹³ (110 días), posterior a eso los costos del sistema Pala-Camión con el *surge loader* incluido son menores al sistema Pala-Camión clásico, si bien el número de horas puede variar la Figura 36 muestra que con el tiempo si la inclusión del *surge loader* logra disminuir dos camiones el sistema Pala-Camión con el *surge loader* incluido se vuelve una opción económica más rentable que el sistema Pala-Camión clásico.

¹³ Los resultados mostrados son teóricos y pueden variar para diferentes casos.

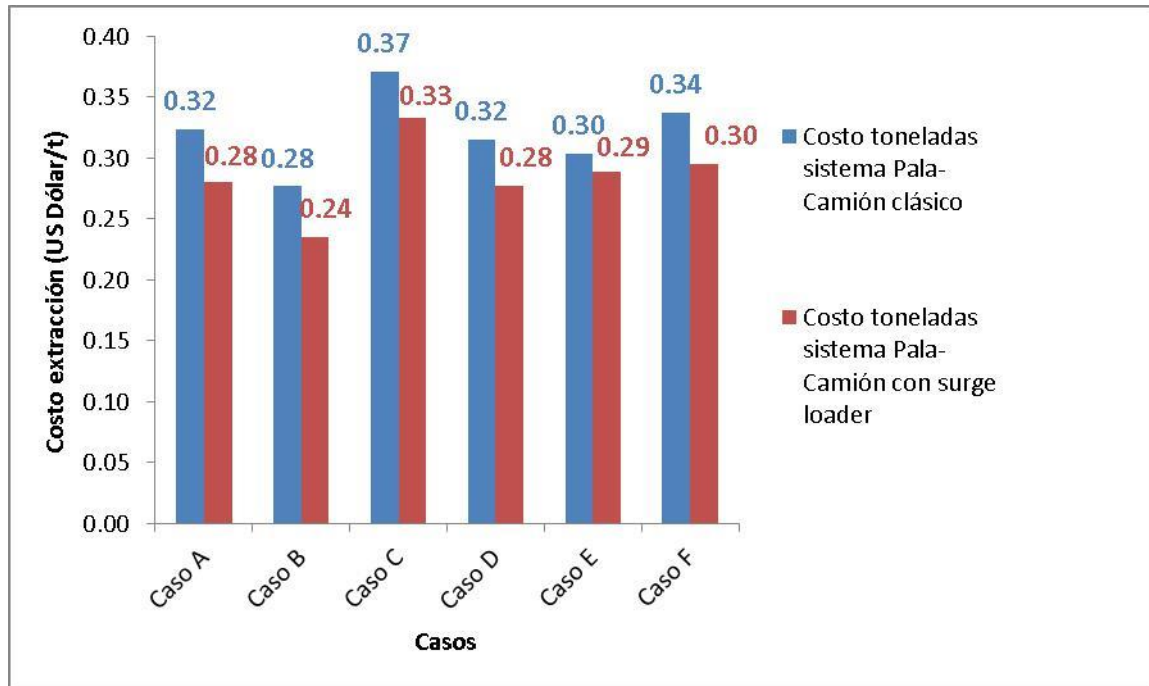


Figura 37: Costo extracción de la pala.¹⁴

La incorporación del *surge loader* también reduciría el costo por tonelada de la pala como se observa en la Figura 37, esta reducción en el costo está relacionada con el aumento en la utilización de la pala generado por el uso del *surge loader*, este aumento implica una mayor producción de la pala en el sistema con el *surge loader* durante las 8 horas de trabajo, esto significa que la incorporación del *surge loader* permite por el mismo costo una mayor extracción de material.

¹⁴ Los costos no son costos oficiales, son solo costos teóricos obtenidos de bibliografía [28] y actualizados según inflación.

Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones

8.1 Conclusiones

En conclusión el *surge loader* genera impactos positivos en el proceso de carguío y transporte, como lo son el incremento de seguridad en las operaciones, el aumento del fill factor en los camiones, el aumento de la utilización y la productividad de los equipos (camiones y palas), estos impactos sumados a la viabilidad económica del equipo hacen posible su incorporación al sistema Pala-Camión. Si bien el sistema de descarga de material (Heavy Duty Apron Plate Feeder) ha sido probado en terreno por separado (Colombia) el *surge loader* no posee pruebas en terreno, sin embargo el análisis de sus características y las simulaciones han probado que su incorporación a la etapa de carguío y transporte es indiscutiblemente beneficiosa para la minería de cielo abierto, por lo cual el *surge loader* es la clave para la redefinición del sistema Pala-Camión del futuro.

Del punto de vista de seguridad, la investigación demuestra que el *surge loader* limita el riesgo de la operación de carguío y transporte al evitar interacciones entre los equipo, su incorporación pudo haber evitado un 3 % de los accidentes fatales ocurridos en Chile y Perú, lo cual no deja de ser un número importante al ser accidentes con víctimas fatales, por lo que su incorporación generaría un proceso de carguío y transporte más seguro.

El *surge loader* al cambiar la dinámica del sistema Pala-Camión clásico logra disminuir los tiempos de espera y maximizar la productividad de los equipos lo que se refleja en el aumento de la productividad de los escenarios simulados de alrededor de un 13 %, si se considera que dentro de las simulaciones no se incorporó el incremento del factor de llenado de los camiones este aumento en la productividad puede ser aún mayor, sumado a esto el análisis económico muestra que el costo global (costo capital más el costo operacional) de incorporar el *surge loader* a la operación minera logra ser menor en un tiempo relativamente corto, sumado al menor costo por tonelada en el proceso de extracción hacen al sistema Pala-Camión con la incorporación del *surge loader* la mejor alternativa para la etapa de carguío y transporte de la minería a cielo abierto.

8.2 Recomendaciones

Las principales recomendaciones son una vez obtenidos los resultados de la prueba en terreno verificar el aumento del factor de llenado de los camiones con el sistema de carga del *surge loader* y comprobar cuanto cambia la productividad con este aumento, además con estos nuevos datos entregados por la prueba en terreno se recomienda realizar un análisis económico más detallado y preciso, finalmente la última recomendación es verificar el impacto de la granulometría en el traspaso de material del *surge loader* al camión.



Referencias

- [1] I. Dzakpata, P. Knights, and M. Nehring, “Truck and Shovel Versus In-Pit Conveyor Systems : a Comparison Of The Valuable Operating Time,” no. February, pp. 463–476, 2016.
- [2] M. Paricheh and M. Osanloo, “Concurrent open-pit mine production and in-pit crushing – conveying system planning,” vol. 0273, 2019.
- [3] K. K. Adams and K. K. Bansah, “Review of Operational Delays in Shovel-Truck System of Surface Mining Operations,” *4th UMaT Bienn. Int. Min. Miner. Conf.*, no. August, pp. 60–65, 2016.
- [4] L. Zhang and X. Xia, “An Integer Programming Approach for Truck-Shovel Dispatching Problem in Open-Pit Mines,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1779–1784, 2015.
- [5] W. HUSTRULID and M. KUCHTA, *OPEN PIT MINE PLANNING & DESIGN*, Student-Paper., vol. 1-Fundamentals. ROTTERDAM: August Aimé Balkema, 1995.
- [6] M. Dean, P. Knights, M. S. Kizil, and M. Nehring, “Selection and Planning of Fully Mobile IPCC Systems for Deep Open-Pit Metalliferous Applications,” *Third Int. Futur. Min. Conf.*, no. November, pp. 219–223, 2015.
- [7] M. Berwick and M. Farooq, “Truck Costing Model for Transportation Managers,” no. January, p. 63, 2003.
- [8] A. J. Krause, “S H O V E L – T R U C K CYCLE SIMULATION METHODS IN SURFACE MINING,” University of Witwatersrand, Johannesburg, 2006.
- [9] S. Alarie and M. Gamache, “Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines,” *Int. J. Surf. Mining, Reclam. Environ.*, vol. 16, no. 1, pp. 59–76, 2002.
- [10] H. S. Sharma, “Comparative economic analysis of transportation systems in surface coal mines,” *Int. J. Surf. Mining, Reclam. Environ.*, vol. 5, no. 1, pp. 17–23, 1991.
- [11] J. Baek and Y. Choi, “A new method for haul road design in open-pit mines to support efficient truck haulage operations,” *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 7, 2017.
- [12] G. Liu and S. Chai, “Optimizing open-pit truck route based on minimization of time-varying transport energy consumption,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2019, 2019.
- [13] J. G. Londoño, P. F. Knights, and M. S. Kizil, “Modelling of In-Pit Crusher Conveyor alternatives,” *Trans. Institutions Min. Metall. Sect. A Min. Technol.*, vol. 122, no. 4, pp. 193–199, 2013.
- [14] D. S. Nilsson, “in Pit Crushing and Grinding I.,” in *Energy Consumption and Costs for*

- Different Haulage Systems in a Large Hypothetical Open Pit Copper Mine*, 1983, no. 83-MPD/M&E-05.
- [15] S. G. Ercelebi and A. Bascetin, “Optimization of shovel-truck system for surface mining,” *J. South. African Inst. Min. Metall.*, vol. 109, no. 7, pp. 433–439, 2009.
- [16] M. Tavakoli, A. Hashemi, and F. Moosakazemi, “Review of the in-pit crushing and conveying (IPCC) system and its case Study in copper industry,” *First World Copp. Congr.*, no. October, 2011.
- [17] “In-Pit Crushing and Conveying | Terranova Technologies,” *In-Pit Crushing and Conveying*. [Online]. Available: <https://www.tntinc.com/equipment/inpit>. [Accessed: 21-Sep-2020].
- [18] Support Staff, “The spotlight shines on landmark MMD invention - Prospect Mining Awards,” 27-Nov-2019. [Online]. Available: <https://prospectawards.com.au/the-spotlight-shines-on-landmark-mmd-invention/>. [Accessed: 08-Sep-2020].
- [19] “The 2019 Prospect Awards finalists - Australian Mining,” 25-Sep-2019. [Online]. Available: <https://www.australianmining.com.au/news/the-2019-prospect-awards-nominations/>. [Accessed: 08-Sep-2020].
- [20] MMD, “FULLY MOBILE SURGE LOADER CATALOG.” 2019.
- [21] P. McCarthy, *MMD Changing the future of mining*. Sydney, Australia, 2019.
- [22] MMD, “Mmd Sizers,” no. 8.1. El Grupo de Empresas MMD, 2017.
- [23] C. J. Bise, “Mining Engineering Analysis.,” *Min Eng Anal*, 1986.
- [24] G. E. Editec, “» Detección de proximidad para equipos mineros en operaciones de extracción.” [Online]. Available: <https://www.mch.cl/reportajes/deteccion-de-proximidad-para-equipos-mineros-en-operaciones-de-extraccion/>. [Accessed: 24-Sep-2020].
- [25] MUTUAL-SEGURIDAD, “Prevención de riesgos en minería del cobre Apunte curso Prevención de riesgos en minería del cobre a rajo abierto.” Mutual de seguridad CChC, Santiago, Chile, 2018.
- [26] R. C. Candia, W. T. Hennies, R. C. Azevedo, and I. G. A. J. F. Soto, “Análisis de accidentes fatales en la industria minera peruana,” vol. 121, no. 1, pp. 57–68, 2010.
- [27] S. Fiscor, “Productivity Considerations for Shovels and Excavators,” *Eng. Min. J.*, vol. 208, no. 7, pp. 38–42, 2007.
- [28] B. B. W. M. E. Gosling and B. B. A. N. O. Gosling, “Mine and Mill Equipment Costs :An Estimator’s Guide,” no. 509, pp. 70–71, 2008.

Anexos

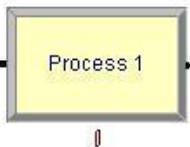
Anexo A: Módulos software Arena



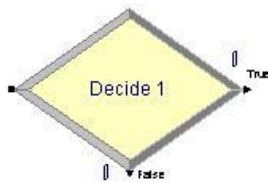
Módulo de inicio de ciclos: Punto de partida de los ciclos al dar comienzo al recorrido de las distintas variables.



Módulo de fin de ciclos: Punto de finalización de los ciclos al dar fin al recorrido de las distintas variables.



Módulo de procesos: Asigna los ajustes de un proceso presente en el ciclo (tiempo, número de variables, etc.).



Módulo de decisión: Divide en dos o más rutas al ciclo en base a una norma o decisión que se debe cumplir.



Módulo de clonación: Duplica las variables, generando dos o más ciclos independientes.



Módulo de asignación: Cambia el valor de las variables en el ciclo.



Módulo de continuación: Da inicio a los ciclos independientes de las variables previamente clonadas (Módulo de clonación).

Figura 38: Módulos y definiciones software Arena.

Anexo B: Tiempo de los procesos de los modelos simulación

Tabla 7: Tiempos de los procesos de los modelos de simulación.

		Casos					
		A	B	C	D	E	F
Tiempo ciclo pala (min)							
Extracción	mínimo	0.13	0.10	0.13	0.10	0.13	0.13
	media	0.17	0.12	0.17	0.12	0.17	0.17
	máximo	0.25	0.22	0.25	0.22	0.25	0.25
Giro	mínimo	0.11	0.08	0.11	0.08	0.11	0.11
	media	0.14	0.10	0.14	0.10	0.14	0.14
	máximo	0.22	0.19	0.22	0.19	0.22	0.22
Descarga	mínimo	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.10
	media	0.15	0.14	0.15	0.14	0.15	0.15
	máximo	0.25	0.24	0.25	0.24	0.25	0.25
Regreso	mínimo	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	media	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
	máximo	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
Tiempo ciclo camión (min)							
Maniobra punto carga	mínimo	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	media	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
	máximo	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Viaje punto de descarga	mínimo	23.55	19.03	25.90	18.10	18.83	6.75
	media	28.55	24.03	30.90	23.10	23.83	11.75
	máximo	38.55	34.03	40.90	33.10	33.83	21.75
Maniobra punto descarga	mínimo	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	media	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	máximo	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
Descarga	mínimo	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	media	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	máximo	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Viaje punto de carga	mínimo	11.82	2.55	13.24	8.73	9.00	3.33
	media	16.82	7.55	18.24	13.73	14.00	8.33
	máximo	26.82	17.55	28.24	23.73	24.00	18.33
Tiempo Surge loader (min)							
Maniobra punto de carga (camión)	mínimo	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
	media	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
	máximo	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Descarga	mínimo	1.17	1.23	1.17	1.24	1.15	1.13
	media	1.25	1.31	1.25	1.32	1.23	1.21
	máximo	1.42	1.48	1.42	1.49	1.40	1.38

Anexo C: Información base de los casos de estudio

Caso A:

Tabla 8: Información base Caso A.

Información Camión					
Capacidad Camión	300.00	tons	(bajo fill factor)		
Velocidades					
Vacío Ex-Pit	(km/h)	40.00			
Cargado Ex-Pit	(km/h)	35.00			
		Pendientes			
		3%	6%	9%	10%
Subiendo Vacío	(km/h)	30.00	24.00	20.00	20.00
Subiendo Cargado	(km/h)	28.00	20.00	15.00	14.00
Bajando Vacío	(km/h)	32.00	29.00	29.00	26.00
Bajando Cargado	(km/h)	28.00	19.00	19.00	19.00
Perfiles de Transporte					
Distancia en Banco	800.00	m			
Distancia en Rampa 10%	5600.00	m			
Distancia Ex-Pit a Acopio	1800.00	m			
Información Pala					
Capacidad	73.00	yd3			
Pases para cargar camión	4				
Cantidad por pase	75.00	tons	(bajo fill factor)		
Tiempo medio carguío	30.00	s			
Tiempo aculatamiento	30.00	s			
Tiempo salida desde carguío	20.00	s			

Caso B:

Tabla 9: Información base Caso B.

Información Camión					
Capacidad Camión	320.00	tons	(bajo fill factor)		
Velocidades					
Vacío Ex-Pit	(km/h)	38.00			
Cargado Ex-Pit	(km/h)	30.00			
		Pendientes			
		3%	6%	9%	10%
Subiendo Vacío	(km/h)	28.00	22.00	18.00	16.00
Subiendo Cargado	(km/h)	25.00	18.00	14.00	13.00
Bajando Vacío	(km/h)	30.00	27.00	26.00	25.00
Bajando Cargado	(km/h)	25.00	18.00	17.00	15.00
Perfiles de Transporte					
Distancia en Banco	650.00	m			
Distancia en Rampa 9%	4300.00	m			
Distancia Ex-Pit a Acopio	2150.00	m			
Información Pala					
Capacidad	77.00	yd3			
Pases para cargar camión	4				
Cantidad por pase	80.00	tons	(bajo fill factor)		
Tiempo medio carguío	25.00	s			
Tiempo aculatamiento	30.00	s			
Tiempo salida desde carguío	25.00	s			

Caso C:

Tabla 10: Información base Caso C.

Información Camión					
Capacidad Camión	300.00	tons	(bajo fill factor)		
Velocidades					
Vacío Ex-Pit	(km/h)	40.00			
Cargado Ex-Pit	(km/h)	35.00			
		Pendientes			
		3%	6%	9%	10%
Subiendo Vacío	(km/h)	30.00	24.00	20.00	20.00
Subiendo Cargado	(km/h)	28.00	20.00	15.00	14.00
Bajando Vacío	(km/h)	32.00	29.00	29.00	26.00
Bajando Cargado	(km/h)	28.00	19.00	19.00	19.00
Perfiles de Transporte					
Distancia en Banco	825.00	m			
Distancia en Rampa 10%	6100.00	m			
Distancia Ex-Pit a Acopio	1950.00	m			
Información Pala					
Capacidad	58.00	yd3			
Pases para cargar camión	5				
Cantidad por pase	60.00	tons	(bajo fill factor)		
Tiempo medio carguío	30.00	s			
Tiempo aculatamiento	25.00	s			
Tiempo salida desde carguío	15.00	s			

Caso D:

Tabla 11: Información base Caso D.

Información Camión					
Capacidad Camión	325.00	tons	(bajo fill factor)		
Velocidades					
Vacío Ex-Pit	(km/h)	35.00			
Cargado Ex-Pit	(km/h)	30.00			
		Pendientes			
		3%	6%	9%	10%
Subiendo Vacío	(km/h)	28.00	22.00	18.00	16.00
Subiendo Cargado	(km/h)	25.00	18.00	14.00	13.00
Bajando Vacío	(km/h)	30.00	27.00	26.00	25.00
Bajando Cargado	(km/h)	25.00	18.00	17.00	17.00
Perfiles de Transporte					
Distancia en Banco	700.00	m			
Distancia en Rampa 10%	3900.00	m			
Distancia Ex-Pit a Acopio	1850.00	m			
Información Pala					
Capacidad	63.00	yd3			
Pases para cargar camión	5				
Cantidad por pase	65.00	tons	(bajo fill factor)		
Tiempo medio carguío	25.00	s			
Tiempo aculatamiento	27.00	s			
Tiempo salida desde carguío	20.00	s			

Caso E:

Tabla 12: Información base Caso E.

Información Camión					
Capacidad Camión	290.00	tons	(bajo fill factor)		
Velocidades					
Vacío Ex-Pit	(km/h)	42.00			
Cargado Ex-Pit	(km/h)	36.00			
		Pendientes			
		3%	6%	9%	10%
Subiendo Vacío	(km/h)	32.00	27.00	23.00	23.00
Subiendo Cargado	(km/h)	28.00	20.00	15.00	14.00
Bajando Vacío	(km/h)	35.00	32.00	28.00	26.00
Bajando Cargado	(km/h)	28.00	19.00	19.00	19.00
Perfiles de Transporte					
Distancia en Banco	800.00	m			
Distancia en Rampa 9%	5000.00	m			
Distancia Ex-Pit a Acopio	1500.00	m			
Información Pala					
Capacidad	71.00	yd3			
Pases para cargar camión	4				
Cantidad por pase	72.50	tons	(bajo fill factor)		
Tiempo medio carguío	30.00	s			
Tiempo aculatamiento	30.00	s			
Tiempo salida desde carguío	20.00	s			

Caso F:

Tabla 13: Información base Caso F.

Información Camión						
Capacidad Camión	280.00	tons	(bajo fill factor)			
Velocidades						
Vacío Ex-Pit	(km/h)	42.00				
Cargado Ex-Pit	(km/h)	36.00				
			Pendientes			
			3%	6%	9%	10%
Subiendo Vacío	(km/h)	32.00	27.00	23.00	23.00	
Subiendo Cargado	(km/h)	28.00	20.00	15.00	14.00	
Bajando Vacío	(km/h)	35.00	32.00	28.00	26.00	
Bajando Cargado	(km/h)	28.00	19.00	19.00	19.00	
Perfiles de Transporte						
Distancia en Banco	1050.00	m				
Distancia en Rampa 6%	2500.00	m				
Distancia Ex-Pit a Acopio	1500.00	m				
Información Pala						
Capacidad	68.00	yd3				
Pases para cargar camión	4					
Cantidad por pase	70.00	tons	(bajo fill factor)			
Tiempo medio carguío	30.00	s				
Tiempo aculatamiento	25.00	s				
Tiempo salida desde carguío	15.00	s				

Anexo D: Resultados simulación

Caso A:

Tabla 14: Resultados pala caso A.

Pala		
Simulación	8.00	h
Extracción	53925.00	ton
Productividad	6740.63	ton/h
Utilización	100.00	%

Tabla 15: Resultados sistema pala-camión clásico caso A.

Sistema Pala-Camión			
Simulación	8.00	8.00	h
N° Palas	1	1	
N° Camiones	20	22	
Extracción	44625.00	51525.00	ton
Stock	41700.00	48000.00	ton
Material cargado en la pala	0.00	0.00	ton
Material cargado en el camión	225.00	225.00	ton
Material en ruta	2700.00	3300.00	ton
Camiones en ruta al stock	9.00	11.00	
Camiones de regreso del stock	7.00	8.00	
Camiones cargando	1.00	1.00	
Camiones en espera	2.00	2.00	
Productividad pala	5578.13	6440.63	ton/h
Productividad camiones	5212.50	6000.00	ton/h
Utilización Pala	82.75	95.55	%

Tabla 16: Resultado sistema pala-camión con surge loader incluido caso A.

Sistema Surge Loader		
Simulación	8.00	h
N° Palas	1	
N° Camiones	8	
Extracción	51525.00	ton
Stock	48000.00	ton
Material cargado en la pala	0.00	ton
Material cargado en el surge loader	225.00	ton
Material en ruta	3300.00	ton
Camiones en ruta al stock	11.00	
Camiones de regreso del stock	7.00	
Camiones cargando	1.00	
Camiones en espera	0.00	
Productividad pala	6440.63	ton/h
Productividad camiones	6000.00	ton/h
Utilización Pala	95.55	%

Caso B:

Tabla 17: Resultados pala caso B.

Pala		
Simulación	8.00	h
Extracción	64000.00	ton
Productividad	8000.00	ton/h
Utilización	100.00	%

Tabla 18: Resultados sistema pala-camión clásico caso B.

Sistema Pala-Camión			
Simulación	8.00	8.00	h
N° Palas	1	1	
N° Camiones	17	19	
Extracción	52560.00	61760.00	ton
Stock	49600.00	57920.00	ton
Material cargado en la pala	0.00	80.00	ton
Material cargado en el camión	80.00	240.00	ton
Material en ruta	2880.00	3520.00	ton
Camiones en ruta al stock	9.00	11.00	
Camiones de regreso del stock	4.00	3.00	
Camiones cargando	1.00	1.00	
Camiones en espera	3.00	4.00	
Productividad pala	6570.00	7720.00	ton/h
Productividad camiones	6200.00	7240.00	ton/h
Utilización Pala	82.13	96.50	%

Tabla 19: Resultados sistema pala-camión con surge loader incluido caso B.

Sistema Surge Loader		
Simulación	8.00	h
N° Palas	1	
N° Camiones	17	
Extracción	61760.00	ton
Stock	58240.00	ton
Material cargado en la pala	80.00	ton
Material cargado en el surge loader	240.00	
Material en ruta	3200.00	ton
Camiones en ruta al stock	10.00	
Camiones de regreso del stock	5.00	
Camiones cargando	1.00	
Camiones en espera	1.00	
Productividad pala	7720.00	ton/h
Productividad camiones	7280.00	ton/h
Utilización Pala	96.50	%

Caso C:

Tabla 20: Resultados pala caso C.

Pala		
Simulación	8.00	h
Extracción	43140.00	ton
Productividad	5392.50	ton/h
Utilización	100.00	%

Tabla 21: Resultados sistema pala-camión clásico caso C.

Sistema Pala-Camión			
Simulación	8.00	8.00	h
N° Palas	1	1	
N° Camiones	17	18	
Extracción	36840.00	41100.00	ton
Stock	33900.00	37800.00	ton
Material cargado en la pala	60.00	0.00	ton
Material cargado en el camión	180.00	0.00	ton
Material en ruta	2700.00	3300.00	ton
Camiones en ruta al stock	9.00	11.00	
Camiones de regreso del stock	4.00	4.00	
Camiones cargando	1.00	1.00	
Camiones en espera	3.00	2.00	
Productividad pala	4605.00	5137.50	ton/h
Productividad camiones	4237.50	4725.00	
Utilización Pala	85.40	95.27	%

Tabla 22: Resultados sistema pala-camión con surge loader incluido caso C.

Sistema Surge Loader	
Simulación	8.00 h
N° Palas	1
N° Camiones	17
Extracción	41100.00 ton
Stock	38100.00 ton
Material cargado en la pala	60.00 ton
Material cargado en el surge loader	240.00 ton
Material en ruta	2700.00 ton
Camiones en ruta al stock	9.00
Camiones de regreso del stock	7.00
Camiones cargando	1.00
Camiones en espera	0.00
Productividad pala	5137.50 ton/h
Productividad camiones	4762.50 ton/h
Utilización Pala	95.27 %

Caso D:

Tabla 23: Resultados pala caso D.

Pala		
Simulación	8.00	h
Extracción	52910.00	ton
Productividad	6613.75	ton/h
Utilización	100.00	%

Tabla 24: Resultados sistema pala-camión clásico caso D.

Sistema Pala-Camión			
Simulación	8.00	8.00	h
N° Palas	1	1	
N° Camiones	17	19	
Extracción	44135.00	50180.00	ton
Stock	41600.00	47450.00	ton
Material cargado en la pala	65.00	65.00	ton
Material cargado en el camión	195.00	65.00	ton
Material en ruta	2275.00	2600.00	ton
Camiones en ruta al stock	7.00	8.00	
Camiones de regreso del stock	6.00	6.00	
Camiones cargando	1.00	1.00	
Camiones en espera	3.00	4.00	
Productividad pala	5516.88	6272.50	ton/h
Productividad camiones	5200.00	5931.25	ton/h
Utilización Pala	83.42	94.84	%

Tabla 25: Resultados sistema pala-camión con surge loader incluido caso D.

Sistema Surge Loader		
Simulación	8.00	h
N° Palas	1	
N° Camiones	17	
Extracción	50180.00	ton
Stock	47450.00	ton
Material cargado en la pala	65.00	ton
Material cargado en el surge loader	65.00	ton
Material en ruta	2600.00	ton
Camiones en ruta al stock	8.00	
Camiones de regreso del stock	6.00	
Camiones cargando	1.00	
Camiones en espera	2.00	
Productividad pala	6272.50	ton/h
Productividad camiones	5931.25	ton/h
Utilización Pala	94.84	%

Caso E:

Tabla 26: Resultados pala caso E.

Pala		
Simulación	8.00	h
Extracción	52127.50	ton
Productividad	6515.94	ton/h
Utilización	100.00	%

Tabla 27: Resultados sistema pala-camión clásico caso E.

Sistema Pala-Camión			
Simulación	8.00	8.00	h
N° Palas	1	1	
N° Camiones	18	20	
Extracción	47197.50	49735.00	ton
Stock	44370.00	46980.00	ton
Material cargado en la pala	72.50	0.00	ton
Material cargado en el camión	145.00	145.00	ton
Material en ruta	2610.00	2610.00	ton
Camiones en ruta al stock	9.00	9.00	
Camiones de regreso del stock	4.00	6.00	
Camiones cargando	1.00	1.00	
Camiones en espera	4.00	4.00	
Productividad pala	5899.69	6216.88	ton/h
Productividad camiones	5546.25	5872.50	ton/h
Utilización Pala	90.54	95.41	%

Tabla 28: Resultados sistema pala-camión con surge loader incluido caso E.

Sistema Surge Loader		
Simulación	8.00	h
N° Palas	1	
N° Camiones	18	
Extracción	49735.00	ton
Stock	46980.00	ton
Material cargado en la pala	0.00	ton
Material cargado en el surge loader	145.00	ton
Material en ruta	2610.00	ton
Camiones en ruta al stock	9.00	
Camiones de regreso del stock	7.00	
Camiones cargando	1.00	
Camiones en espera	1.00	
Productividad pala	6216.88	ton/h
Productividad camiones	5872.50	ton/h
Utilización Pala	95.41	%

Caso F:

Tabla 29: Resultados pala caso F.

Pala		
Simulación	8.00	h
Extracción	50330.00	ton
Productividad	6291.25	ton/h
Utilización	100.00	%

Tabla 30: Resultados sistema pala-camión clásico caso F.

Sistema Pala-Camión			
Simulación	8.00	8.00	h
N° Palas	1	1	
N° Camiones	11	13	
Extracción	41930.00	48160.00	ton
Stock	40600.00	46480.00	ton
Material cargado en la pala	0.00	0.00	ton
Material cargado en el camión	210.00	0.00	
Material en ruta	1120.00	1680.00	ton
Camiones en ruta al stock	4.00	6.00	
Camiones de regreso del stock	4.00	4.00	
Camiones cargando	1.00	1.00	
Camiones en espera	2.00	2.00	
Productividad pala	5241.25	6020.00	ton/h
Productividad camiones	5075.00	5810.00	ton/h
Utilización Pala	83.31	95.69	%

Tabla 31: Resultados sistema pala-camión con surge loader incluido caso F.

Sistema Surge Loader		
Simulación	8.00	h
N° Palas	1	
N° Camiones	11	
Extracción	47950.00	ton
Stock	46200.00	ton
Material cargado en la pala	60.00	ton
Material cargado en el surge loader	70.00	
Material en ruta	1680.00	ton
Camiones en ruta al stock	6.00	
Camiones de regreso del stock	4.00	
Camiones cargando	1.00	
Camiones en espera	0.00	
Productividad pala	5993.75	ton/h
Productividad camiones	5775.00	ton/h
Utilización Pala	95.27	%



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

Título: "Evaluación de impacto del surge loader en operaciones de carguío y transporte de minería cielo abierto"

Nombre Memorista: Ignacio Andrés Osses Aguayo

Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Muy bueno	 Profa. Asieh Hekmat
Calificación	6.7	
Fecha	29-01-2021	
 Prof. FERNANDO PARADA		Ingeniero Supervisor:
		Institución:

Comisión (Nombre y Firma)

 Prof. René Gómez P.	Ing. Ignacio Moscoso
---	-----------------------------

Resumen

La industria minera en la actualidad se enfrenta a distintos desafíos, la disminución de la ley del mineral, la mayor profundidad de las operaciones, entre otras. Es por esto que la industria tiene la constante necesidad de mejorar y optimizar sus procesos por medio de la innovación, en este sentido los procesos de carguío y transporte en minería a cielo abierto han sido uno de los pocos que no ha sufrido grandes cambios. En esta investigación se muestra el impacto que generaría la incorporación del *surge loader* en la etapa de carguío y transporte, por medio del análisis de las características del equipo y efectos que genera en la producción.

El *surge loader* es un equipo completamente móvil compuesto por una tolva y un sistema de traspaso de material similar a un sistema de correas, su función principal es la de recibir el material transportado por la pala y traspasarlo al camión, el gran tamaño de su tolva permite recibir una gran cantidad de material, por lo que la pala pueda trabajar de forma continua, por otro lado su sistema de traspaso de material logra tiempos de carga del camión, menores a los de la pala sumado su sistema de cámaras y sensores permiten eliminar las maniobras que el camión realiza en el punto de carga, reduciendo así el tiempo de ciclo del camión. Su incorporación en las operaciones de carguío y transporte permitiría disminuir las interacciones de la pala con el camión, reduciendo así la probabilidad de accidentes en las operaciones. Hay que señalar que el sistema de alimentación del *surge loader* permite controlar el material cargado al camión, maximizando la carga del camión sin generar *overflowing*, por lo que este equipo aumentara la productividad y eficiencia.

Por medio del software Arena se simulo en seis diferentes escenarios el proceso de carguío y transporte con y sin la incorporación del *surge loader*, lo que permite por medio de la comparación de estos resultados evaluar el impacto que genera este equipo en los procesos de carguío y transporte. Las simulaciones realizadas en esta investigación muestran que la incorporación del *surge loader* aumenta productividad de los camiones en 13 % y utilización de las palas en un 11 %, este aumento es equivalente en la mayoría de los casos a incorporar dos camiones más a la flota de camiones. Al comparar los costos estimados del *surge loader* con los de dos camiones se observa que si bien el costo capital del *surge loader* es mayor a de dos camiones, el costo operacional es menor por lo que con el tiempo es económicamente más rentable trabajar con el *surge loader*, demostrando que el *surge loader* es una opción viable la etapa de carguío y transporte al optimizar los tiempos, disminuir los riesgos y aumentar la productividad, todo esto siendo rentable económicamente.