



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA PALA-CAMIÓN EN UNA MINA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO

OPTIMIZATION MODEL OF A LOAD- TRUCK SYSTEM IN AN OPEN SKY COAL MINE

Sandra Isabel Molina Arenas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2021

MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA PALA-CAMIÓN EN UNA MINA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO

OPTIMIZATION MODEL OF A LOAD- TRUCK SYSTEM IN AN OPEN SKY COAL MINE

Sandra Isabel Molina Arenas

Trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Recurso Minerales

Director:

PhD, Giovanni Franco Sepúlveda

Codirector:

Magíster. José Luis Consuegra

Línea de Investigación: Optimización en minería

Grupo de Investigación:

Grupo de Planeamiento Minero-GIPLAMIN

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2021

A Dios que me dono la vida.

Para mis padres Enrique M y Cecilia A, por su comprensión y ayuda en momentos malos y menos malos, me han enseñado a afrontar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

Para mi compañero de vida Danilo Alberto Turizo, por su paciencia, por su comprensión, por su empeño, por su fuerza, por su amor, por ayudarme a conseguir un equilibrio que me permita dar el máximo de mí. Y ayudarme a confiar en mis capacidades para no desfallecer.

Para mis hermanos y sobrinos en especial a mi hermano Carlos Andrés Molina quien siempre ha creído en mí y me impulsa a conseguir mis propósitos, por cada palabra de aliento y confianza. A todos ellos, muchas gracias de todo corazón.

Sandra Isabel Molina Arenas

Agradecimientos

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo de todas las personas que desde su posición, hicieron esto una realidad, Mi reconocimiento y gratitud.

Primero y como más importante, me gustaría agradecer sinceramente a mi director y tutor Tesis, PhD, Giovanni Franco Sepúlveda quien con su esfuerzo y dedicación, su persistencia, y su motivación han sido fundamentales para mi formación como investigador.

A mi codirector Magister. José Luis Consuegra por sus orientaciones su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científica en un marco de confianza, afecto y amistad, fundamentales para la concreción de no podría tener una formación completa como investigador.

A la Universidad Nacional a sus autoridades y profesores por abrir sus puertas y darme la confianza necesaria formar parte del programa de maestría del Departamento de Materiales y Minerales de la facultad de minas.

A la Fundación universitaria del Área Andina que me ha dado la oportunidad de hacer parte de ella en el programa de ingeniería de Minas donde oriento académicamente lo máspreciado los estudiantes que al convertirse en profesionales cristalizan las ideas de la Universidad en la sociedad.

A mi jefe Ing. Ober Adiel Romero, quien me motivo, impulso, quien ha sido capaz de ganarse mi lealtad y admiración, así como sentirme en deuda con él por todo lo recibido durante el periodo de tiempo que ha durado este trabajo final de maestría.

A la empresa minera donde laboro por permitirme realizar esta investigación, en especial a mi jefe Ing. Roberto José Zabarrain' quien me motivo, apoyo, y confió para la realización de este proyecto, agradezco su orientación y paciencia en todo. Esté tiempo.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que les encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

Resumen

Los desafíos de la operación minera radican en la custodia de información confiable y análisis de esta lo que hace que sea una actividad demasiado compleja, sumado a un conjunto de labores entre máquina y operario que se encuentra ligado a muchos factores que son específicos dentro de una operación minera eficiente y calificada que inciden en extremo cuidado en el tiempo. Una simple ejecución que lleve al retardo de una variable con llevaría al desequilibrio económico y con esta la reducción de la producción. Dentro del proceso de actividades unitarias de minería a cielo abierto tenemos el sistema pala-camión que ha llegado incluso a constituir el 50% y 60% de los costos operativos, el análisis adecuado de las variables involucradas en este sistema permite la toma de decisiones oportunas en la operación. El sistema antes mencionado es la matriz de estudio que permitirá el planteamiento de un algoritmo evolutivo no determinístico, que admita la optimización de los tiempos muertos del sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo abierto hacia la disminución de la incertidumbre que no son tenidas en cuenta en la mayoría de análisis mineros. En el caso de nuestra investigación las nombramos como: t_x (incertidumbres de ida) y t_y (incertidumbre de regreso), que permita una pronta repuesta a la toma de decisiones en la planeación a corto plazo y mejore la productividad. Esta herramienta nos entrega una gama de posibles ganadores (cromosomas) con reducción de tiempos mínimos de hasta 1,3 minutos y máximos de 5,3 minutos en el tiempo de ciclo, obteniendo una ganancia hasta de 51,75 bcm/h del proceso para el caso del ejercicio aplicado, además permite ajustarse según las restricciones del evaluador teniendo en cuenta la velocidad, contantes del proceso y población objetivo. Dentro de la literatura los procesos estocásticos en su mayoría se encuentra enfocados en las actividades unitarias de minería polimetálica, con esta propuesta presentamos una herramienta aplicada a la minería de carbón totalmente adaptativa a las condiciones de operación manual del sector en pro del desarrollo minero local.

Palabras clave: Optimización; Minería a cielo abierto; Carbón; Algoritmo evolutivo.

Abstract

The challenges of the mining operation lie in the custody of reliable information and its analysis, which makes it an activity that is too complex, added to a set of tasks between machine and operator that is linked to many factors that are specific within an efficient and qualified mining operation that takes great care in time. A simple execution that leads to the delay of a variable with would lead to economic disequilibrium and with this the reduction of production. Within the process of unit activities of open pit mining we have the shovel-truck system that has even constituted 50% and 60% of the operating costs, the adequate analysis of the variables involved in this system allows the taking of opportune data. in operation. The aforementioned system is the study matrix that will allow the approach of a non-deterministic evolutionary algorithm, which allows the optimization of the dead times of the shovel-truck system in an open-cast coal mine towards the reduction of the uncertainty that are not taken into account in most mining analyzes. In the case of our research, we name them as: t_x (outward uncertainties) and t_y (return uncertainty), which allows a prompt response to decision-making in short-term planning and improves productivity. This tool gives us a range of possible winners (chromosomes) with a reduction of minimum times of up to 1.3 minutes and maximum of 5, 3 minutes in cycle time, obtaining a gain of up to 57, 1 bcm / h of the process for that matter. of the applied exercise, it also allows adjusting according to the evaluator's restrictions, taking into account the speed, process constants and target population. Within the literature, stochastic processes are mostly focused on polymetallic mining unit activities, with this proposal we present a tool applied to coal mining that is fully adaptive to the manual operating conditions of the sector in favor of local mining development.

Keywords: Optimization; Open pit mining; Coal; Evolutionary algorithm.

Contenido

1.	ANTECEDENTES.....	18
1.1	Descripción del problema.....	18
1.2	Pregunta de investigación.....	19
1.3	Revisión bibliográfica.....	20
1.4	Justificación.....	24
1.5	Objetivos.....	25
1.5.1	Objetivo general.....	25
1.5.2	Objetivos específicos.....	25
1.6	Alcance.....	25
1.6.1	Limitaciones.....	26
2.	MARCO TEORICO.....	27
2.1	Minería a Cielo Abierto.....	27
2.1.1	Sistema Minero.....	29
2.1.2	Maquinaria de Mina.....	30
2.2	Modelos y Análisis de Sistemas Dinámicos.....	33
2.2.1	Modelos.....	34
2.2.2	Métodos de simulación.....	35
2.2.3	Metaheurística.....	36
2.2.4	Incertidumbre operacional.....	37
2.2.5	Definición de tiempos.....	38
2.3	Optimización de un sistema Pala- Camión.....	39
2.2.6	Optimización no determinista de minería a cielo abierto.....	49
3.	MARCO METODOLÓGICO.....	53
3.1	Investigación descriptiva.....	54
3.1.1	Revisión Bibliográfica.....	54
3.1.2	Estructura Metodológica.....	54
3.1.3	Identificación de Población.....	55
3.2	Modelo propuesto.....	57
3.2.1	Dinámica operacional del sistema de Acarreo.....	57
3.2.2	Parámetros operacionales.....	58
3.2.3	Formulación del Modelo del sistema.....	60
3.2.4	Interpretación de la incertidumbre operacional.....	61
3.2.5	Construcción del Algoritmo.....	62
3.2.6	Caracterización de datos para el proceso de acarreo en una mina cielo abierto de carbón.....	64
3.2.7	Muestreo.....	65
4.	ESTUDIO DE CASO.....	68
4.1	Conformación de la Mina.....	68
4.1.1	Geología del Yacimiento.....	69
4.1.2	Método de Explotación.....	70
4.2	Clasificación y Procesamiento y de Datos.....	70
4.2.1	Selección de sectores y cálculos de distancias.....	71
4.2.2	Organización en Base de Datos.....	73
4.2.3	Promedio Tiempos de Cargue Actuales.....	74
4.2.4	Promedio de Pases por Match.....	76
4.3	Aplicación del modelo.....	77

4.4	Input de la Investigación.....	81
4.5	Resultados y análisis.....	82
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	109
5.1	Conclusiones	109
5.2	Recomendaciones	111
6.	Anexo:.....	113
7.	Bibliografía	115

Lista de Figuras

Figura 1-1 Sistema de Acarreo	18
Figura 2-2 Operaciones Unitarias en Minera a Cielo Abierto.....	28
Figura 2-3 Ciclo del camión en minería a cielo abierto.....	29
Figura 2-4 Ciclos de acarreo en minería a cielo abierto	30
Figura 2-5 Distribución de literatura para ES.....	31
Figura 2-6 Indicadores de Tiempos en sistema Pala- Camión.....	39
Figura 3-7 Modelo Metodológico del Proyecto.....	55
Figura 3-8 Equipos de cargue de estéril.....	55
Figura 3-9 Equipos de acarreo de estéril.....	56
Figura 3-10 Excavadora Hitachi EX3600 cargando camión Hitachi EH4000 mientras que camión CAT 793D espera y Buldócer D10T en espera para arreglar la plaza.....	56
Figura 3-11 Esquema de sistema de transporte planteado	58
Figura 3-12 .Diagrama de flujo del AG aplicando ponderación lineal	63
Figura 3-13 Modelo de Simulación Optimización	63
Figura 3-14 Lógica general de equipos de simulación.....	64
Figura 3-15 Lógica general de equipos de cargue	65
Figura 4-16 Localización Sectores Mina.....	69
Figura 4-17 Configuración espacial del área de estudio.....	71
Figura 4-18 Promedio ciclos de cargue CAT 6060 FS/793D.....	74
Figura 4-19 Promedio ciclos de cargue HITACHI EX3600/789C_EH3500.....	74
Figura 4-20 Promedio ciclos de cargue HITACHI EX3600/793D_EH4000.....	74
Figura 4-21 Promedio ciclos de cargue HITACHI EX2500/777F.....	75
Figura 4-22 Promedio ciclos de cargue HITACHI EX1900-6/777F.....	75
Figura 4-23 Promedio ciclos de cargue TEREX RH120-E/777F.....	76
Figura 3-24 Tendencia de análisis de datos.....	77
Figura 3-25 Comportamiento ciclo de cargue.....	78
Figura 3-26 Comportamiento ciclo de viaje FullTP-VF	79
Figura 4-27 Población Inicial	82
Figura 4-28 Selección de población.....	83
Figura 4-29 Generación que cumple con rangos T_i	83
Figura 4-30 Tiempos de espera permitidos	84
Figura 4-31 Tendencia Tiempo de espera vs Tiempo de ciclo Total.....	86
Figura 4-32 Tiempo t_x óptimos.....	87
Figura 4-33 Tendencia T_x óptimos.....	89
Figura 4-34 Cromosomas t_y Vs T_{tc}	90
Figura 4-35 Tendencias T_y	92
Figura 4-36 Grafica de Pareto solución óptima	95
Figura 4-37 Población Inicial	96
Figura 4-38 Selección de población por velocidad	96
Figura 4-39 Generación que cumple con rangos de velocidad.....	97
Figura 4-40 Generación que cumple con rangos para TTC	98
Figura 4-41 Selección y optimización para tiempos de espera t_e	99

Figura 4-42 Tendencia Tiempo de espera vs Tiempo de ciclo Total	100
Figura 4-43 Selección y optimización para tiempos variable de ida t_x	101
Figura 4-44 Tendencia Tiempo variable de ida vs Tiempo de ciclo Total	102
Figura 4-45 Selección y optimización para tiempos variable de ida t_y	103
Figura 4-46 Tendencia Tiempo variable de vuelta vs Tiempo de ciclo Total.....	104
Figura 4-47 Grafica de Pareto solución óptima	105

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 3-1. Fases para el desarrollo de la investigación.	53
Tabla 3-2 Combinaciones o matches existentes.....	57
Tabla 3 3 Formato para muestreo en campo Formato para muestro en plaza.....	66
Tabla 3-4 Formato para muestreo en camiones	66
Tabla 4-5 Total Muestras.....	71
Tabla 4-6 Distancia entre frente de carga y descarga.....	72
Tabla 3-7. Base de datos de tiempos recolectados	73
Tabla 3-8 Promedio de pases por match.	77
Tabla 4-9 Inputs generales de flota de camiones	81
Tabla 4-10 Inputs generales de flota de palas	81
Tabla 4-11 capacidad de camiones a utilizar	81
Tabla 4-12 Tiempo de espera óptimos	84
Tabla 4-13 Iteración tiempo espera vS Tx	88
Tabla 4-14 Tiempos variables de vuelta (Ty óptimos).....	90
Tabla 4-15 Relación tiempo de ciclo total optimo.....	93
Tabla 4-16 Comparación de Datos AE - Campo.....	95
Tabla 4-17 Valores óptimos estimados para te	98
Tabla 4-18 Valores óptimos estimados para tx	100
Tabla 4-19 Valores óptimos estimados para ty	102
Tabla 4-20 Relación tiempo total de ciclo total TTC optimo.....	104
Tabla 4-21 muestra de campo distancia 2,5km	106
Tabla 4-22 tabla comparativa bcm.....	106
Tabla 4-23 Tabla comparativa US/BCM	106
Tabla 4-24 Caculo de número de camiones (AGMO)	108

Introducción

La industria minera enfrenta el reto de responder a la mayor demanda de recursos minerales, la disminución de las leyes del mineral, los estrictos requisitos de calidad y las estrictas regulaciones ambientales al tratar de satisfacer las demandas de la economía (M. Govinda Raj, Harsha Vardhan, Y.V. Rao, 2009), las extracciones mineras están afectadas por un sin número de incertidumbres geológicas, operativas, sociales de mercado, uno de los factores que incluyen en sus procesos y que son de suma importancia son los tiempos muertos, los cuales de algún modo entorpecen y aumentan la pérdida directa de capital para la industria minera.

Dentro de las incertidumbres operativas están los tiempos muertos que corresponden a interrupciones sobre aquellos sistemas para lo cual se están desarrollando ciertas operaciones Según (Zhou, 2014), el cual desarrolló 3 tipos de algoritmos predictivos para minimizar estas interrupciones, el primer tipo es la sustitución optimizada de una medida heurística, el segundo es la programación lineal, basada en algoritmos y por último algoritmos de retroalimentación.

La implementación de estas técnicas tradicionales busca orientar a las empresas sobre como determinar sus procesos de extracción del mineral con el objetivo de reducir costos y mejorar la eficiencia, obteniendo así el mayor beneficio posible usando cada día las herramientas de apoyo adecuada, cuyo uso es fundamental para lograr resultados efectivos.

Durante las actividades de cargue y transporte la presencia de demoras, no operativas y operativas, presenta un problema en los KPI'S (KEY PERFORMANCE INDICADTOR) de acuerdo (Apaza Risco, 2017), el bajo uso de los equipos afecta la productividad y no permite lograr el cumplimiento de la producción mensual. Estas interrupciones generan sobrecostos, proceso que resta competitividad y eventualmente afecta la rentabilidad.

Existen investigaciones que exponen las diferentes optimizaciones de un sistema pala-camión en una mina a cielo abierto aplicando métodos lineales y no lineales de extracción, en el cual se hace una caracterización de las diferentes técnicas utilizadas en determinados países.

Según (Mena, R;Zio, E;Kristjanpoller, F;Arata,A, 2013), la disponibilidad del equipo corresponde a una variable de suma importancia dentro de la función de productividad esperada del sistema y no puede pasarse por alto.

(Osarenmwinda, 2013) llevó a cabo un análisis enfocado en el estudio de los tiempos muertos, ocasionados por los fallos que originan pérdidas de producción y altos costos de mantenimiento identificando los componentes críticos que generan los tiempos inactivos, a través de un análisis de Pareto, herramienta tradicional que permitió dirigir todos los esfuerzos a los principales fallos, para obtener mayores resultados.

La manifestación de tiempos muertos en la operación de cargue y transporte en la minería a cielo abierto representa en la mayoría de los casos un problema muy habitual, pues estos tiempos son los que de algún modo determinan la baja productividad en los periodos que ya han sido especificados. La necesidad de mantener una óptima productividad resulta entonces en reducir las procedentes como bajo estándar económico, baja relación de capacidad – producción, una aparición elevada de tiempos muertos (periodos fuera de los calculados), mayores costos de operación entre otros. La actualidad de la minería a cielo abierto ha tolerado de aquellos modelos en los que se emplean flotas de camiones que no tienen una utilización óptima debido a que se presentan errores en muchos de los aspectos de selección y cálculo en la cantidad de los equipos ocasionando una larga fila de tiempos muertos en la operación.

La minería a cielo abierto como método minero de carácter iterativo, permite llevar a cabo la explotación de un recurso mineral; remoción de grandes cantidades de suelo y subsuelo, que es posteriormente procesado para extraer el mineral. Este mineral puede estar presente en concentraciones muy bajas, en relación con la cantidad del material removido.

La necesidad de encontrar un PIT óptimo o predecir las operaciones efectuadas en minería se da por las diferentes pérdidas que se pueden llegar a presentar por una mala referencia, interpretación, diseño o implementación del sistema pala-camión.

(Chen, 2012) Aclara que los tiempos de fabricación son fundamentales para formalizar compromisos de cantidad y fijar tiempo de entrega con los clientes, por lo cual enfoca su trabajo en las técnicas de clasificación y minería de datos fundamentados en la clasificación difusa bidireccional y el enfoque neuronal con el objetivo de mejorar los sistemas de producción. Estas concurrencias en el inicio y transcurso de la operación generan la aparición de tiempos muertos que en “algunos casos” derivan de la escasez de datos estadísticos cuando se pretende realizar el cálculo de número de camiones y palas adecuados dentro de las operaciones, el capital con el que posiblemente no se cuenta para la compra de vehículos de operación y por último el desconocimiento de herramientas de apoyo como software para así variar el cálculo adecuado de la cantidad de camiones necesarios y cumplir con indicadores superiores al 80% de utilización, disponibilidad y eficiencia.

Por lo antes mencionado se busca por medio del desarrollo investigativo generar con el apoyo de un modelo no determinista la optimización de los tiempos muertos de un sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo abierto para la disminución de la incertidumbre en la toma de decisiones para mejorar la productividad.

1. ANTECEDENTES

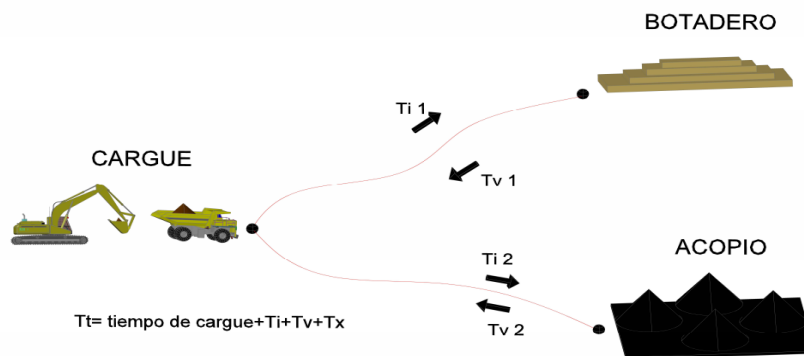
Se busca por medio del desarrollo del presente capítulo generar un recorrido a través de los principales aspectos para lograr establecer el propósito de la construcción investigativa, generando así los insumos necesarios para articular las ideas principales con los elementos necesarios para garantizar el óptimo resultado a lo planteado en la presente investigación.

1.1 Descripción del problema

En la minería a cielo abierto un proceso clave e indispensable es el cargue de los camiones por medio del uso de la pala y es precisamente este sistema el mayormente utilizado para llevar a cabo la actividad que involucra no solo el cargue sino también el transporte del material depositado en el camión, según (Barrientos V. M., 2014) esto sin dejar de mencionar que el desarrollo de la actividad antes mencionada es el responsable de un alto porcentaje de éxito de la operación minera a cielo abierto..

De acuerdo con (Ercelebi & Bascetin, 2009), en el desarrollo de actividades relacionadas con la operación minera, el transporte que realizan los camiones al material depositado por las palas representa el elemento de mayor importancia en cuanto a costos operativos, llegando incluso a constituir un 50 y 60% del total de esta como se observa en la Figura 1.

Figura 1-1 Sistema de Acarreo



Fuente: Elaboración Propia.

Es necesario precisar que, en la ejecución de actividades al interior de la operación minera, un factor que representa un impacto significativo es lograr mantener un nivel

óptimo en lo que tienen que ver con costos de la operación, esto indica que la ecuación adecuada corresponde a minimizar los costos mientras se maximiza el rango de producción. Lo anterior se encuentra directamente ligado con las variables que interactúan a lo largo del proceso de producción en minería a cielo abierto, variables que deben ser controladas con el fin de evitar que se generen altos costos de producción mientras se limita el cumplimiento de las metas trazadas dentro de los planes de operación, (Woollam, 1989), indica, que lograr la eficiencia máxima en una línea de producción corresponde a uno de los objetivos principales de cualquier empresa y que así mismo uno de los mayores problemas que se puede llegar a evidenciar obstaculizando el logro del este objetivo, es la presencia de los tiempos muertos a lo largo del proceso.

Al incluir el concepto de tiempos muertos dentro del proceso de cargue y descargue al interior de un sistema pala-camión, es necesario identificar las variables se encuentran involucradas en la razón por la que este tipo de situaciones se presenta y de este modo poder contralarlas con el fin de generar un alto nivel de eficiencia en el desarrollo de las actividades propias de la producción.

Es precisamente la necesidad de identificar las variables que generan la disminución de la productividad en la operación minera; específicamente, al interior del sistema pala-camión, lo que conlleva al desarrollo de un proceso investigativo con el objetivo de lograr la optimización de los sistemas pala-camión al interior de una mina de carbón a cielo abierto.

Por tal razón, a través de la presente investigación se buscan determinar las variables relevantes dentro del proceso objeto de estudio, con el fin de establecer las distintas alternativas que puedan ser implementadas con el objetivo de optimizar los recursos utilizados en el cumplimiento de los planes operativos cuando se involucra el sistema pala-camión a las actividades de mayor impacto en la operación minera.

1.2 Pregunta de investigación

De acuerdo con lo antes mencionado y en aras de establecer la alternativa que brinde mayor eficiencia al proceso de cargue pala-camión, es necesario realizar la siguiente pregunta de investigación.

¿Cuáles son las variables de mayor relevancia para generar un modelo de optimización de los tiempos muertos de un sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo abierto para la disminución de la incertidumbre en la toma de decisiones para mejorar la productividad?

1.3 Revisión bibliográfica

Lograr alcanzar la eficiencia máxima requerida a lo largo de una línea de producción es sin lugar a dudas uno de los principales objetivos de las empresas responsables de la explotación de carbón a cielo abierto.

De esta forma al hablar de optimización de los procesos se hace referencia al análisis que se realiza al detalle acerca de las distintas actividades que de algún modo integran el proceso, esto con el objetivo de determinar las condiciones, los medios y la ruta óptima, que permita lograr el máximo rendimiento, y el uso adecuado de los recursos, y con esto poder cumplir con los objetivos establecidos. (Tovar & Mota, 2007).

El uso de la palabra optimización en un sentido estricto hace referencia simultáneamente a la optimización de la media y la reducción de la variación. Para lograr proceder a realizar ajustes a la media y la variación se hace necesario determinar cuáles son las causas que conllevan a la introducción de desajustes o lograr el incremento de la variabilidad, entendiendo, la variabilidad al interior de un proceso de manufactura, la variabilidad Debida al uso, y la variabilidad debida a las diferentes condiciones de uso. (Vinué, 2006).

Lo anterior con el objetivo de acercar el concepto de optimización a los procesos de producción, los cuales no son más que un gran número de acciones que se llevan a cabo de forma deliberada, sobre ciertos recursos, que son llamados en algunos casos insumos; con el objeto de acceder a nuevos productos o en algunos casos servicios (Billene, 2004).

Al intentar profundizar en el desarrollo de actividades que tienen por objetivo la optimización de los procesos, es necesario considerar tres variables que son fundamentales: la calidad, el tiempo y los costos, aspectos que se encuentran directamente ligados a la flexibilidad a través de la cual se abordan las actividades desarrolladas, esto con el fin de contar con la capacidad de modificar las variables en

el momento justo y de acuerdo a las necesidades presentes en la empresa. (Araujo, 2018).

Con el objetivo de brindar información que permita comprender las características inherentes a la optimización de los procesos, (Orosco, 2015) plantea que para optimizar los procesos al interior de un sistema es necesario describirlo y analizarlo de forma adecuada: salidas del proceso, expectativas de los procesos posteriores intervinientes, secuencia de actividades, recursos e indicadores. Partiendo de lo descrito se debe proceder a definir, ejecutar y evaluar los procedimientos de trabajo. Una vez creado un ciclo de actividades del proceso ya establecido se pueden buscar posibles mejoras.

Así mismo, (Araujo, 2018) presenta en el marco de investigación que se llevó a cabo una simulación previa con el fin de contrastar con la realidad de la operación a fin de evaluar la alternativa viable, logrando optimizar el proceso y por ende reducir los costos. Para los cuales tomaron datos de campo como el estudio de tiempos y demoras operativas en el proceso de transporte y acarreo de mineral y desmonte.

Por medio de la información obtenida en campo se logra determinar el tiempo total del transporte y cargue de mineral y desmonte la cual, mediante análisis y ajustes, además, se lograron determinar diversos modelos y cálculos para el dimensionamiento de la flota de camiones.

(Bitarafan & Atei, 2004) presentan la necesidad del uso de un adecuado método minero de selección debido a que este facilita la resolución de problemas presentados en el diseño de un proceso minero. Al considerar elementos tales como las propiedades geológicas y geotécnicas, los parámetros económicos, determinados factores técnicos, estrategias de productividad, se busca brindar a los procesos la garantía de éxito minimizando las posibilidades de fracaso y aportando cada recurso disponible a logro de los objetivos trazados, razones por la que, la selección de los equipos, la selección de métodos, sistemas y el dimensionamiento de los resultados esperados, deben ser considerados siempre como una prioridad a lo largo del proceso. (Burt, Caccetta, Hill, Welgama, Zerger, & Argent, 2008).

Como método de mejora para los procesos de operación en minería de carbón, (Olivares, 2011), presenta como propuesta la re instrucción planificada del factor

operacional del sistema pala-camión para identificar las prácticas de dichos operadores de mayor incidencia en el rendimiento final de estos equipos productivos. La planificación de este modelo realiza análisis e intenta correlacionar los factores que afectan la productividad desde el cargue y transporte. Encontrar al operador con mayor índice de mejoras es la oportunidad directa de mejorar la producción mina, dando como resultado un eficiente tiempo en el cargue y transporte.

De la misma forma en Colombia las empresas que desarrollan actividades de Minería a cielo abierto han buscado por medio de la implementación de modelos y herramientas deterministas que excluyen todo tipo de dudas de la evaluación de riesgo con relación a los modelos tradicionales de explotación, cargue y transporte, garantizar un alto nivel de productividad; es debido a esto que (Sepulveda, 2012) plantea la necesidad de generar el desarrollo de modelos alternativos para la planificación minera que logren mejorar las condiciones de competitividad y productividad en términos de los siguientes factores: aumento de la vida de la mina - LOM; Extracción y explotación de recursos de menor calidad; obtención de mayores beneficios del negocio minero; disminución del riesgo y la incertidumbre del proceso de planificación minera, entre otros, enfocándose en las incertidumbres relacionadas al modelo geológico que permita la recuperación de reservas, dejando como alternativa de investigación las incertidumbres operativas como son los ciclos y de cargue y transporte.

Por su parte (Natividad, 2014) por medio de investigación realizada resume el pronóstico de la producción en las operaciones de los equipos de carguío y acarreo del turno día y noche en la mina Antamina, para meses siguientes, a través del uso de métodos estadísticos, apoyados con el método de Montecarlo secundado con el programa *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) y realizando la comparación con los resultados emitidos por el *Dispatch*. La información reportada por el Software *Dispatch* es utilizada para realizar el pronóstico de los índices de rendimiento que se relacionan con los equipos de acarreo y carguío de una operación minera a cielo abierto.

La limpieza de datos disponibles que corresponden a los cambios operacionales de un sistema pala-camión siguiendo restricciones físicas, luego un análisis exploratorio descriptivo y analítico modelando la relación entre las detenciones en estudio y la productividad diaria, corresponde a la metodología planteada por (Barrientos V. M.,

2014) quien luego realiza un modelo de simulación dinámica de eventos discretos que emula la realidad del sistema en estudio, el cual es validado y calibrado con la información que se tiene del sistema real, esto con el objetivo de lograr la optimización del de cargue y transporte al considerar que se deben tener en cuenta las características del equipo y además de analizar el proceso del ciclo del sistema.

(González, 2017) propone a través de investigación realizada, un modelo de bloques tomado de una experiencia validada previamente, dentro de la cual se contaba con un plan de producción utilizada durante toda la operación de una mina, incluyendo periodos de extracción, fases a las que pertenecen y destinos de los bloques. Se tomó un año de producción del proyecto y se asignaron los equipos de manera manual, con el fin de comparar los resultados y planes obtenidos. El modelo desarrollado puede asignar equipos con los que ya se cuenten (flota actual) como también decidir la compra de equipos nuevos. Por otra parte, La presencia de estas actuaciones puede indicar que aún se pueden considerar un mayor número de variables dentro la planificación que pueden permitir construir planes más robustos con el fin de garantizar una operación confiable en términos de producción y alimentación a la planta.

Con el objetivo de realizar una búsqueda de un tabú de aprendizaje, (Araujo, 2018) propone con el fin de resolver un problema de asignación de camiones con componentes de costos lineales y no lineales que permiten bajo un modelo estadístico la inclusión de los métodos exactos basados en una formulación de programa lineal de enteros mixtos están disponibles para variable o factor 1 etc. y que ya no son apropiados para abordar variable 2 o variable 3. De esta forma se plantean varios métodos para el TAP: una búsqueda local de descenso, una búsqueda tabú y una búsqueda tabú de aprendizaje (LTS). Este último es un nuevo tipo de algoritmo de búsqueda local. Implica un proceso de aprendizaje basado en un sistema de senderos y se puede aplicar a cualquier problema de optimización combinatoria. Los resultados se informan y se analizan para un gran conjunto de casos factor 1, 2 y 3 y muestran el buen desempeño.

Por su parte, (Ozdemir & Kumral, 2019) modelan su investigación con el fin de lograr optimizar aquellos tiempos de espera de pala, colas de camiones, ramificaciones en las carreteras, y los problemas de capacidad en las trituradoras que experimentan un déficit en los costes directos o de oportunidad. Se planteó la comparación de las

cantidades de mineral y producción de residuos del sistema de despacho anterior y el marco propuesto, la cantidad total se incrementó con el marco propuesto por 9,4% en un cambio que corresponde a 6.000 toneladas de material. El enfoque tiene un gran potencial para aumentar la productividad de los sistemas de la pala.

Todas las investigaciones anteriores demuestran el reto que ha enfrentado la minería a cielo abierto en cuanto a los incertidumbres operativas especialmente en el sistema pala camión en función de la disminución de los tiempos muertos generados en este, entendiéndose que se ha realizado un estudio importante en minería Metálicas, lo que permite estudiar e implementar en la minería de carbón en relación al tema de optimización y disminución de tiempos muertos en el sistema pala camión, que es fundamental en el grado de eficiencia en la planeación de las operaciones mineras en pro de la disminución de costos de operación.

1.4 Justificación

El grado de eficiencia con el que puede llevarse a cabo la planeación minera apunta a la generación de mayor proyección del recurso y dentro de esta, la posibilidad de considerar que la implementación de métodos no deterministas se convierte en un respaldo para el proceso de disminución de la incertidumbre al interior de la planeación de las actividades de cargue y transporte en la operación minera de carbón, se requiere para la implementación de estrategias que garanticen la eficiencia operacional la incorporación del elemento tecnológico a la ecuación, buscando de esta forma determinar con mayor precisión los puntos que deben ser abordados en la búsqueda de optimizar los procesos.

De esta forma, a través de la identificación de las variables que requieren ser controladas se accede a la información real de los puntos que deben mejorar a lo largo del proceso objeto de estudio, buscado de este modo generar un aumento representativo en la productividad y logrando así maximizar los resultados obtenidos tanto a nivel económico como en estrategias basadas en un modelo de optimización que facilite la evaluación de las variables que no son lineales o que son tenidas en cuenta al interior de un modelo tradicional en el que se lleva a cabo el proceso de cargue y transporte para la reducción de la incertidumbre en la minería de carbón a cielo abierto.

Es una necesidad para la producción minera, incurrir en la toma de las mejores decisiones a través de las etapas de planeación y operación, dado que en la medida en que se implementen las estrategias adecuadas se pueden llevar a cabo estos procesos mientras se cuenta con la recepción de la proporción real de las fallas que se presentan en el factor operacional y es posible establecer la demanda de futuras frecuencias.

La actividad minera requiere innovación permanente por lo que es necesario avanzar en la búsqueda de alternativas que permitan alcanzar los objetivos trazados para la presente investigación y de este modo se logre la optimización de un sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo abierto.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar con el apoyo de un modelo no determinista la optimización de los tiempos muertos de un sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo abierto para la disminución de la incertidumbre en la toma de decisiones para mejorar la productividad.

1.5.2 Objetivos específicos

- a. Determinar en el sistema de cargue y transporte de una explotación de carbón a cielo abierto los posibles factores que incidan en el retardo de la operación.
- b. Formular un modelo de optimización que permita la reducción de los tiempos muertos y determine el factor de asignación de camiones.
- c. Desarrollar el algoritmo de solución al modelo de optimización del sistema de pala-camión combinando técnicas de simulación y optimización.
- d. Aplicar el modelo propuesto en una explotación de carbón a cielo abierto para un caso real.

1.6 Alcance

El presente trabajo de investigación se encuentra orientado principalmente al desarrollo de un documento que contenga, los parámetros claves para el proceso de optimización de los tiempos muertos de un sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo

abierto para la disminución de la incertidumbre en la toma de decisiones en pro de la productividad, buscando así, evaluar con el apoyo de un modelo no determinista la optimización de los tiempos muertos en el sistema antes mencionado. Lo anterior por medio de la generación de un modelo no determinístico, utilizando como principal insumo el desarrollo de un algoritmo que facilite la evaluación de la optimización convirtiéndola en un apoyo fundamental para el análisis de la productividad.

1.6.1 Limitaciones

La presente investigación tiene como limitaciones la dificultad para acceder a información de los sistemas implementados actualmente y el acceso a campo para el desarrollo de mediciones en tiempo real.

Adicional a esto es necesario mencionar como limitaciones existentes en el desarrollo investigativo que no serán tenidas en cuenta las demoras en los tiempos de cargue, ya que serán evaluadas las rutas asignadas dentro de la operación. De la misma forma es necesario precisar que las incertidumbres se limitarán a la información base recolectada para la creación del modelo.

2. MARCO TEORICO

Uno de los retos de la minería a cielo abierto es implementar métodos innovadores que permita identificar los parámetros claves que permita la optimización de los tiempos muertos de un sistema pala-camión se hace necesario el desarrollo de un estricto recorrido por los conceptos que brindan la oportunidad de obtener una orientación clara y crear bases sólidas referentes al tema objeto de la misma. (Cerde, 1998).

Entendiendo que el marco teórico de la investigación puede considerarse como la recopilación de un conjunto de elementos conceptuales y teóricos que forman la base de la indagación objeto de la investigación en curso. (Arias, 2012), con el objetivo de abordar la presente investigación.

De acuerdo a lo mencionado, se procura generar un análisis en las temáticas que aportan valor, buscando de esta forma determinar como a través del apoyo de un modelo no determinista se logra generar la optimización de los tiempos muertos de un sistema pala-camión en una mina de carbón a cielo abierto para la disminución de la incertidumbre en la toma de decisiones para mejorar la productividad.

2.1 Minería a Cielo Abierto

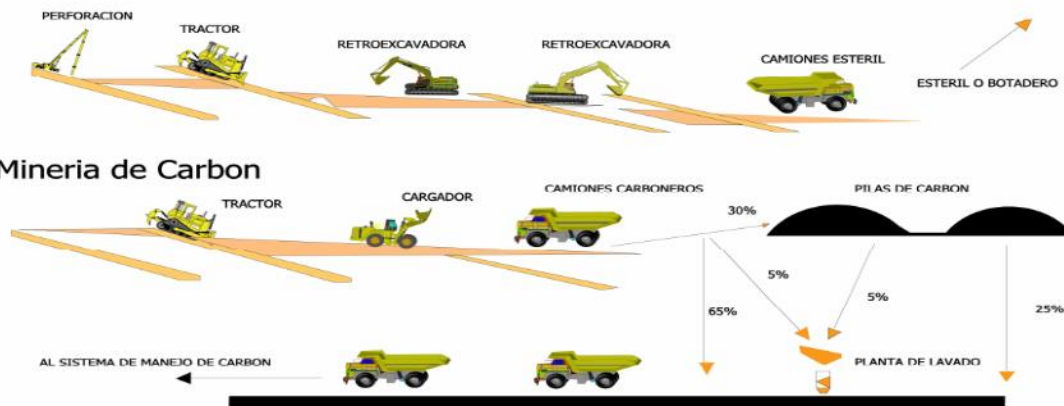
La minería a cielo abierto es definida (Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M., 2002) como el proceso de extracción de un depósito mineral cercano a la superficie, típicamente metálico o no metálico. Este método permite la producción de recursos minerales a bajo costo que hacen posible acceder a la extracción de depósitos metálicos con leyes que decrecen en el tiempo. Además, da lugar a la utilización de sistemas mecanizados con equipos de producción masiva, siendo una actividad intensiva en capital.

El esquema de la Figura 2. Muestra una típica mina a cielo abierto de explotación de carbón. La excavación se realiza mediante la construcción de bancos (*bench*), que permiten el avance en profundidad manteniendo la estabilidad geotécnica de las paredes de la mina. El acarreo de material dentro de la mina requiere de rampas de acceso (*ramp*) y caminos (*haulage road*) que permitan la circulación de

los equipos de transporte entre los distintos sectores. Y el material es cargado por palas eléctricas o hidráulicas. El ciclo de producción en minería a cielo abierto utiliza operaciones unitarias que generalmente involucran perforación, tronadura, carguío y transporte. Dichas operaciones unitarias necesitan de equipos de apoyo (tractores y motoniveladoras) que ayudan a mantener el rendimiento en la operación. En este tipo de minería el material estéril extraído es llevado al botadero y el mineral útil es trasladado al acopio y depositado en pilas.

Figura 2-2 Operaciones Unitarias en Minería a Cielo Abierto.

Minería de esteril



Fuente: Elaboración Propia.

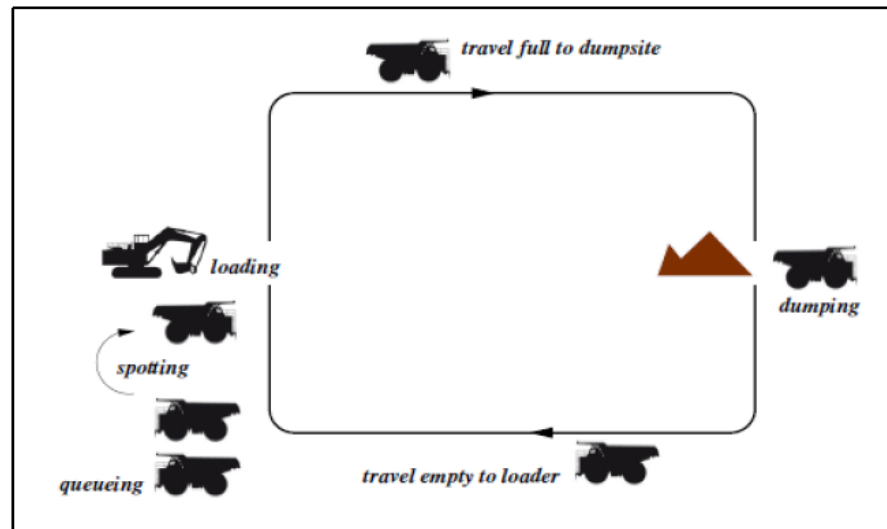
Las etapas que conforman el sistema de explotación hacen parte fundamental del desarrollo productivo de cualquier mina, pues el mal desempeño de alguna puede introducir cambios sustanciales la relación costo – beneficio de los proyectos de explotación minera.

Uno de los factores que inciden en esa relación costo beneficio hace referencia al cargue y transporte del material, remontando específicamente en cómo afecta la variación de camiones asignados a una pala para ser cargados y posteriormente transportar la carga, que en este caso obedece en su defecto a material volado.

El ciclo de los equipos de acarreo en minería a cielo abierto comprende las etapas de tiempo de carga, tiempo de ida, descarga, tiempo de vuelta, esperas o demoras y posicionamiento (o aculatamiento), para ser nuevamente cargado. El

tiempo que toma un ciclo de camión se mide considerando todas las etapas mencionadas. La Figura 2-3 muestra el ciclo de acarreo del camión en la minería a cielo abierto.

Figura 2-3 Ciclo del camión en minería a cielo abierto.



Fuente: (Burt C. &, 2009).

Por otro lado, según, (Nehring, 2018) la implementación de sistemas IPCC (*Continuous In-Pit Crushing and Conveying systems*) en operaciones de roca dura en minas a cielo abierto requiere enfoques de planificación diferentes y más integrales para reflejar adecuadamente los aspectos prácticos asociados con estos (Nehring, 2018), el proceso de planificación y evaluación en una mina, debe con llevar a maximizar la recuperación general de recursos acompañando los procesos con el uso de los sistemas del IPCC.

2.1.1 Sistema Minero

De acuerdo a lo expuesto por (Mejía, 2009), los sistemas mineros son aquellos que tienen un grupo de caracteres que se relacionan entre sí. Un ejemplo de ellos pueden ser los sistemas de aire comprimido, sistemas cargue-transporte, entre otros.

a. **Sistemas Abiertos:** Son aquellos que sus caracteres se relacionan entre sí y más aún se relacionan con su entorno o ambiente de trabajo.

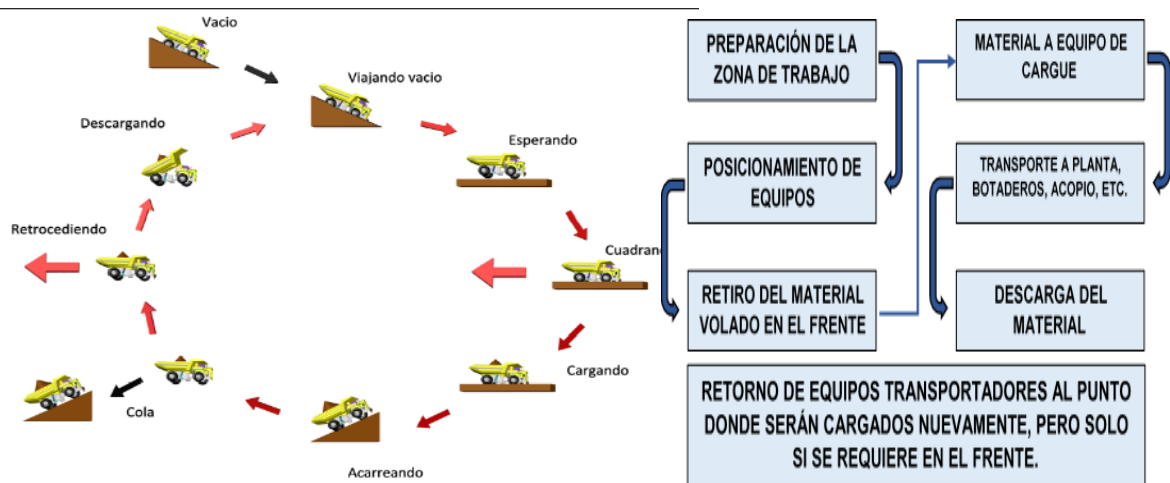
b. **Sistemas Cerrados:** Son aquellos que la relación es única con sus caracteres no tiene intervención con el ambiente o el entorno laboral, además estos se les hace llamar sistemas determinísticos.

2.1.2 Maquinaria de Mina

En las operaciones de minería de superficie, el transporte de material que realizan los camiones es el elemento más importante en los costos operativos, constituyendo del 50 al 60% del total. Asignar y despachar los camiones de manera eficiente es un factor que permitiría la capacidad de estimar las medidas de rendimiento del sistema (rendimiento de la mina, número medio de camiones, tiempo medio de espera, entre otros) para fines de planificación (Ercelebi & Bascetin, 2009).

Los parámetros para tener en cuenta en la selección de equipos derivan del plan minero de explotación y muestran del sistema aquellas variables importantes como las condiciones del entorno, las características del yacimiento y la geometría de la explotación (Scribd , 2014) y los tiempos que intervienen en la operación como lo podemos ver en la **Figura 2-4** Ciclos de acarreo en minería a cielo abierto Figura 2-4 Ciclos de acarreo en minería a cielo abierto donde la sincronía en los tiempos es de vital importancia en la eficiencia de productividad de los equipos.

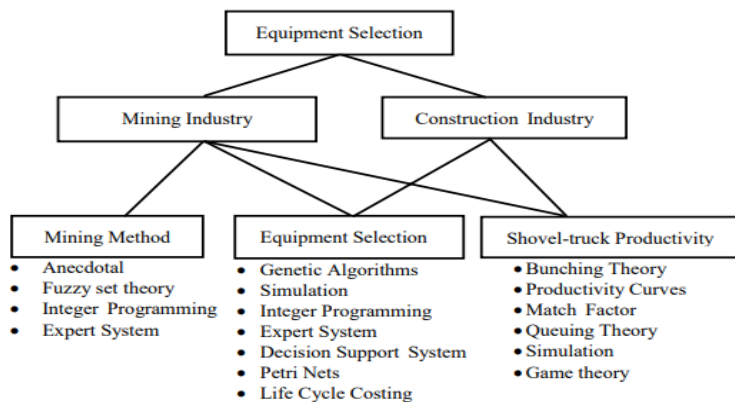
Figura 2-4 Ciclos de acarreo en minería a cielo abierto



Fuente: Elaboración propia

Según (Burt, Caccetta, Hill, Welgama, Zerger, & Argent, 2008) El problema general de selección de equipo hace referencia a la elección de un grupo de elementos compatibles, pero no necesariamente homogéneos, con el objetivo de realizar una tarea específica. En muchas ocasiones, la actividad a realizar corresponde a mover un volumen de material de un número determinado de ubicaciones a un número de destinos. Sin embargo, los equipos cuentan con diferentes atributos que pueden interactuar de manera compleja con respecto a la productividad. Como se puede a continuación ver en la **Figura 2-5** Distribución de literatura para ES.

Figura 2-5 Distribución de literatura para ES.



Fuente: Modelos para la selección de equipos de minería (Burt, Caccetta, Hill, Welgama, Zerger, & Argent, 2008)

Si bien es cierto que en minería existen un sinnúmero de vehículos y objetos que sirven para realizar las determinadas funciones y así elevar su producción y eficiencia, a estos se le hace llamar maquinaria de mina que son todas y cada una de las máquinas que se encuentran dentro de una mina; ahora bien, entrando en materia del proyecto dentro de un sistema de carga y transporte se encuentran tres vehículos que son esenciales dentro de él. Según (Scribd, 2014) en su folleto “selección de la maquinaria dentro de una mina” expresa que dentro del sistema de carga y transporte se puede hacer por un sistema de banda transportadora o por un sistema de pala-camión, en este último los vehículos utilizados son camiones, palas y cargadores.

- i. Camión: vehículo todo terreno, con chasis rígido, específicamente diseñado para ser usado en explotaciones mineras, con finalidad de cargue en tolva, algunas clases de ellos son Caterpillar 797F, Caterpillar 794 AC, Caterpillar 773F (Caterpillar, 2019).
- ii. Pala: Una pala cargadora es una máquina de uso frecuente en construcción de edificios, minería, obras públicas como pueden ser carreteras, autopistas, túneles, presas hidráulicas y otras actividades que impliquen movimiento de tierra o rocas de grandes volúmenes, pueden ser de dos tipos de cargue frontal y retroexcavadora.
 - a. Cargue frontal: son aquellas que como su nombre lo indica cargan el material de forma frontal y pueden ser eléctricas, hidráulicas y por cable.
 - b. Cargue de retro: son aquellas que cargan de manera contraria a la frontal. (Asencio, 2017).

El problema actual en cuanto a maquinaria proporciona un marco para clasificar varios problemas que son nuevos desde la planificación del transporte. Este problema de considerar un grupo de camiones que virtualmente son programados para transitar uno detrás del otro aplicando nuevas tecnologías de conducción automatizada está considerando nuevos beneficios en reducción de costos, emisiones reducidas y un uso más eficiente de la capacidad de la carretera. Para mejorar aún más estas nuevas técnicas se requiere planificación detallada de cada camión solo en función de los itinerarios y disponibilidad de cada máquina (Anirudh, Niels, & Z, 2017).

Por otro lado, (Zhang, 2015) el problema de despacho de camiones en minas a cielo abierto se considera un problema de programación ya que se requiere una adecuada definición de estas actividades para determinar de manera óptima el número de viajes de camiones desde una pala (sitio de carga) a un sitio de descarga (botadero o pilas). El resultado del despacho tiene como objetivo responder a la pregunta de dónde debe ir un camión para que el objetivo de producción se logre con un costo operativo mínimo.

Continuando con la importancia de definir así donde debe dirigirse el camión con la finalidad de reducir costos operativos y tiempos muertos en el sistema pala camión, (Czaplicki J. , 2009), en el proceso de enlace del sistema de transporte, un enlace corresponde al ubicado en el punto de carga o descarga, y la segunda unidad se mueve entre el primer enlace y el punto de su destino.

(Seyyedhasani, Dvorak, & IAgRE, 2018), expone una investigación a través de la cual se presenta la simulación de un problema de rotación de vehículos (VRP) en trabajo de campo y se verifica la capacidad de este sistema de optimización para reducir los tiempos de trabajo de campo. Los experimentos se realizaron con tres tractores durante una operación de corte rotativo. Primero, se registraron las rutas tradicionales utilizadas por los conductores humanos. Luego, se creó una simulación de VRP de esta operación y se generaron nuevas rutas mediante un procedimiento de optimización de búsqueda Tabú.

Por otro lado, (Yang, 2018) manifiesta que la minería no tripulada es uno de los campos esenciales de la tecnología minera en la actualidad. Por lo tanto, la optimización con un ciclo de velocidad de conducción conocido para el ahorro de combustible, las emisiones, la capacidad de conducción y más, ya no es exclusiva, se ha estudiado la trayectoria de velocidad óptima basada en información de la carretera. Dado que tanto el consumo de combustible como el tiempo de transporte influyen en los costos de transporte de los camiones mineros, en este estudio se propone e ilustra una estrategia de gestión energética (EMS) (Energy Management System) basada en la optimización de la velocidad en un camión minero eléctrico híbrido en serie.

2.2 Modelos y Análisis de Sistemas Dinámicos

Si bien se entiende que los sistemas pueden ser abiertos o cerrados, dentro de estos los sistemas se clasifican por lo general en relación con su estado, pues es aquel que en un espacio determinado de tiempo es el valor dentro de un banco de variables que rigen de forma estructurada y de acuerdo con esto pueden ser dinámicos o estáticos.

En (Mejía, 2009) se define los sistemas estáticos como aquellos cuyos valores no cambian con el tiempo y así los dinámicos serán en donde los valores varíen con el tiempo y que cuya variación puede ser cíclica y aleatoria dando lugar a una nueva subdivisión dentro de los sistemas dinámicos.

Los sistemas dinámicos entonces pueden ser:

- i. Continuo: cuando las variables varían de forma continua con el tiempo.

- ii. Discreto: cuando las variables que lo describen varían de una forma discreta sobre el tiempo.
- iii. Híbridos: cuando en un sistema dinámico las variables varían unas de forma continua y otras de forma discreta.

Los cambios en los escenarios de precios del mineral y la búsqueda de mejores prácticas en la minería, hace que las empresas reaccionen rápidamente para mantenerse competitivas en el mercado. Para que las decisiones se adopten de forma más ágil y asertiva, el dominio del proceso y un conjunto de soluciones tecnológicas son necesarias para apoyar esas decisiones y reducir el riesgo de sus consecuencias lo que obliga a la aplicación de una nueva metodología como es el cálculo de índices de desempeño operacional de la flota de transporte en una mina de hierro a cielo abierto. (B. De Souza, 2018).

En este estudio se propone una metodología que utiliza la información contenida en la base de datos del sistema de despacho de flotas para relacionar la velocidad media de la flota de camiones con la información en los puntos de origen (frente de explotación) y destino (local de descarga) de material (mineral y estéril) planeados, permite un dimensionamiento asertivo y dinámico de la flota de camiones de transporte de gran capacidad en minas a cielo abierto y así la creación de innumerables escenarios con las más diversas rutas y destinos, utilizando parámetros reales y actualizados con el trabajo diario.

2.2.1 Modelos

La distribución exponencial es otra heurística que (Rajagopal, 2014) proponen para minimizar los tiempos muertos de los de procesos de producción.

En Colombia las empresas que desarrollan actividades de minería a cielo abierto, han buscado por medio de la implementación de modelos y herramientas deterministas que excluyen todo tipo de dudas de la evaluación de riesgo con relación a los modelos tradicionales de explotación, cargue y transporte, garantizar un alto nivel de productividad; es debido a esto que (Sepulveda, 2012) plantea la necesidad de generar el desarrollo de modelos alternativos para la planificación minera que logren mejorar las condiciones de competitividad y productividad.

La finalidad específica de la implementación de modelos de operación en los procesos mineros, es determinar qué sucederá en la ejecución de los sistemas si se tomaran en cuenta diferentes hipótesis, ya que se presentan alternativas de entornos a base de simulación con el fin de mostrar bases fuertes y veraces con el fin de definir futuros acertados a raíz de supuestos. Como en los sistemas, existe una clasificación definida para los modelos, teniendo en cuenta la forma en que se pretende representar la realidad, dentro de los cuales se encuentran: Dinámicos, estáticos, matemáticos, físicos, determinísticos, discretos entre otros (Ramos, 2010).

2.2.2 Métodos de simulación

Con respecto a los métodos de simulación (Ventura, 2010), más que hablar de herramientas, describe la importancia de la educación de la minería de datos (EDM por sus siglas en inglés) y de cómo esta ha ido creciendo a través de los años como lo demuestra el número de publicaciones acerca del tema, por lo cual especifican que es un área madura y de alto impacto, la cual tiene miles de aplicaciones, que apalancan el interés de aplicar alguna de sus técnicas para identificar las causas que generan tiempos muertos en una línea de producción.

La gran mayoría de los modelos matemáticos de tipo dinámico representan sistemas continuos, es decir sistemas en los que las actividades del sistema causan pequeñas variaciones en los atributos de sus caracteres o entidades, cuando las relaciones entre ellas son descritas por ecuaciones diferenciales se dan una tasa o ratios en los cuales los atributos cambian, por este motivo las ecuaciones diferenciales los describen (Marcano, 2017).

A través de su estudio de investigación (Lins, Cano, & Arroyo, 2018) pretenden realizar un apropiado dimensionamiento de una flota de equipos a través de técnicas avanzadas de programación estocástica, representando el problema real por medio de modelos de simulación.

El propósito, entonces, es evaluar los escenarios de producción, predecir el comportamiento del sistema de carguío y transporte de materiales y finalmente analizar la utilización de la maquinaria, así como también, determinar de manera objetiva el tamaño de flota que obedezca las demandas de producción exigidas por la planta. Por

otro lado, se pretende realizar una comparación entre el dimensionamiento analítico y estocástico; y obtener mayores elementos de análisis para una toma de decisiones más acertadas.

2.2.3 Metaheurística

Metaheurística corresponde a la optimización por algoritmos que por lo general se inspiran en el comportamiento de la naturaleza, los cuales han sido aplicados con más frecuencia en los últimos años en todo el mundo, debido a su rendimiento en comparación con los tradicionales ya que estos tienden a exigir demasiado tiempo para los modelos complejos que cuentan con gran tamaño, no continua, no lineal, entre otros (Wout Dullaert, 2002)

La selección de un algoritmo es relevante para el alcance de las soluciones óptimas requeridas en cualquier problema que se aborda. (Esmoris, 2013), establece que al elegir la técnica metaheurística a utilizar, se hace frente a un problema dado, de acuerdo a Esmoris existen 3 factores a considerar: en primer lugar, la eficiencia del algoritmo, en segundo lugar, se identifica el algoritmo para abordar el problema de manera adecuada, y como tercera medida se debe tener en cuenta la eficacia de la solución numérica utilizada. La obtención del algoritmo es relevante para el alcance de las soluciones óptimas requeridas en el problema, se priorizan los objetivos para el que se diseñó el algoritmo, ya que en la literatura existen muchas técnicas de este tipo, sin embargo, no todos son aplicables en cualquier situación.

Se propone un nuevo enfoque, basado en las diferencias en el factor de coincidencia: una flota de camiones heterogénea, una flota de palas heterogénea y una flota que comprende camiones y palas heterogéneas (Chaowasakoo, 2017).

El estudio de simulación proporciona evidencia de que el factor de coincidencia puede usarse para determinar rangos para números de diferentes tipos de camiones en una flota óptima. La elección de métodos de despacho de camiones heurísticos tiene una influencia significativa en el rendimiento. Además, los resultados simulados revelan diferencias en la producción con diferentes tipos de flotas heterogéneas.

Se propone una heurística de búsqueda local de dos niveles a un problema de enrutamiento de vehículos atribuidos a su heterogeneidad, instalaciones de carga y

costos operativos (De Giovanni, 2017), en primer lugar, una búsqueda Tabú estocástica de población variable que determina la asignación de orden de cada vehículo y el segundo nivel se ocupa de la optimización dentro de la ruta. Dichas rutas se planifican diariamente teniendo en cuenta las restricciones y preferencias sobre sus capacidades, duración máxima, número de horas de conducción consecutivas y períodos de descanso obligatorios para los conductores, puntos de terminación de rutas, agregación de pedidos, entre otros.

2.2.4 Incertidumbre operacional

La cuantificación de la incertidumbre operacional en sistemas de acarreo de materiales en la minería a cielo abierto ha sido abordada por numerosos autores. En la literatura predominan los estudios que tratan de cuantificar la influencia de la política de despacho de camiones en los resultados del sistema.

A lo largo de las lecturas de la revisión bibliográfica, se puede observar que las técnicas utilizadas para representar la naturaleza estocástica de los parámetros operacionales corresponden a modelar dichos parámetros como distribuciones de probabilidad, los que posteriormente alimentarán a un modelo de simulación.

Según (Manriquez Leon, 2015) la actividad minera está sujeta a distintos tipos de incertidumbre: mercado, geológica y operacional. Las incertidumbres antes mencionadas provocan diferencias entre los resultados del plan minero real y el plan esperado, la correcta evaluación del impacto de cada una de ellas en los resultados del plan minero podría permitir identificar las que mayor impacto tienen y tratar de gestionarlas mediante planes de acción.

Cabe recordar que, en la incertidumbre operacional, se identifican tres tipos: los asociados a parámetros operacionales, a los eventos operacionales y a la reasignación de componentes operacionales. La asociada a parámetros operacionales tiene relación con los tiempos, velocidades y capacidades de los componentes mineros. La asociada a eventos operacionales tiene que ver con los eventos de no disponibilidad y finalmente la asociada a la reasignación operacional tiene relación con la estrategia de operación ante cambios de no disponibilidad de componentes mineros.

Por otra parte, para representar los cambios de estado en la disponibilidad de equipos de carga y transporte, la literatura asume directamente distribuciones de probabilidad para el tiempo entre fallas (*time between failures*, TBF) y el tiempo para reparar (*time to repair*, TTR). Se debe señalar que, al representar la disponibilidad de los equipos, mediante tiempos entre fallas y tiempos de reparación, no se está considerando la existencia de mantenciones programadas de los componentes mineros, cuyo inicio y duración se conocen de antemano.

A lo largo de este estudio se suma (Chavez, 2016), quien es su investigación tiene en cuenta como variable de estudio el operador, evaluando a cada operador para así identificar los niveles de aprendizaje en cuanto al sistema de despacho de camiones, conocimientos obtenidos y si era necesario gestiones extra operacionales que le permitiera al sistema identificar o priorizar el rendimiento eficaz, asociarlo con un nivel X por la mala o ineficiente manera de operar un sistema.

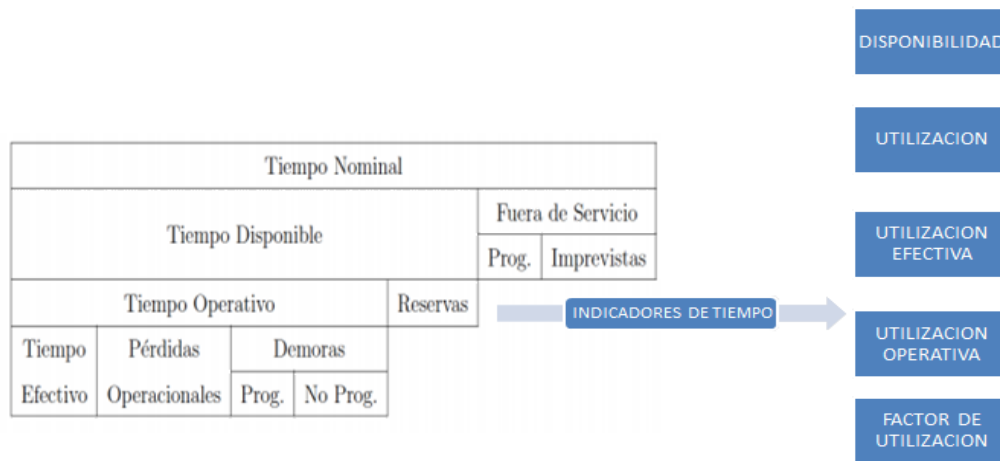
2.2.5 Definición de tiempos

La norma ASARCO es el marco de referencia utilizado para la definición de conceptos y distribución de los tiempos que un equipo, máquina o instalación incurre durante un periodo de tiempo. De la Figura 2-6 se puede apreciar que:

- a. Nominal: Espacio de tiempo en que se produce la medición, correspondiente al espacio muestral. Depende del tiempo de continuidad de la producción en la jornada de trabajo.
- b. Disponible: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra capacitado de realizar tareas.
- c. Reserva: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra disponible para realizar alguna tarea, pero que por alguna condición específica no está siendo utilizado.
- d. Operativo: Espacio de tiempo en que el equipo se encuentra apto para realizar tareas y cumple con actividades asociadas a la operación.
- e. Demoras programadas: Espacio de tiempo en que no se realizan las tareas para las que el equipo fue diseñado, pero donde se deben cumplir ciertas actividades normadas por la ley, como lo son los cambios de turno o tiempos de colación.

- f. Demoras no programadas: Espacio de tiempo en que no se realizan las tareas para las que el equipo fue diseñado, pero que ocurren debido a condiciones o circunstancias propias de la operación, o ineficiencias de ésta.
- g. Pérdidas operacionales: Espacio de tiempo en que el equipo no realiza las tareas para las que fue diseñado, debido principalmente a tiempos de espera del equipo.
- h. Efectivo: Espacio de tiempo en que el equipo realiza las tareas acordes a su funcionalidad.

Figura 2-6 Indicadores de Tiempos en sistema Pala- Camión.



Fuente: Elaboración propia

2.3. Optimización de un sistema Pala- Camión

Los sistemas de gestión de la flota se dividen en tres problemas relacionados con la revisión: la ruta más corta, la optimización de la producción y el despacho en tiempo real. Finalmente, las limitaciones de los algoritmos actuales para los sistemas de gestión de flotas se documentan en términos de la viabilidad de la práctica minera y la optimización de la solución en problemas a gran escala, esto de acuerdo a lo expuesto por (Moradi, Tabesh, & Askari, 2019).

En uno de esos sistemas, existen múltiples conjuntos que funcionan bajo normas o procedimientos que regulan el funcionamiento del otro conjunto. Esta medida se relaciona con la base fuente de trabajo para los equipos pesados. El combustible también tiene contribución en este apartado por el simple hecho de ser una variable de

alto costo en toda la operación. Un equipo sin combustible es perdido directo para el objetivo principal de una empresa. Es un modo efectivo de reducir el consumo de combustible en la dinámica de reducir las distancias inter vehiculares en una flota de vehículos pesados para la operación. Dentro de este marco (Doig Patrick, Kizil Mehmet S, 2013) en su proyecto de investigación cuantifico el valor agregado a través de detalles adicionales en el análisis de acarreo, específicamente, el beneficio de cambiar con frecuencia los caminos de acarreo, para facilitar este proceso, se analizaron diecinueve escenarios de transporte con diversos detalles, utilizando uno de los sistemas de mayor acogida en la minería Talpac, automatizado el cálculo de rutas de camiones Esto ha permitido reducir el potencial de ubicaciones de minería y descarga en otras más pequeñas porciones, es decir, bloque y banco. A partir de esto, múltiples opciones para rutas de transporte y destinos pueden ser calculado para lograr mejor un objetivo predefinido. Además se creó el modelo geológico y la topografía. Del análisis realizado, se estableció una relación clara identificado entre la disminución de la frecuencia de cálculo de la ruta de acarreo y el error de varianza inversa de la media del tiempo del ciclo. La investigación mostró que realizar dos análisis de transporte en lugar de uno solo para un trayecto puede afectar los tiempos de ciclo del camión calculados del 6% al 14%. Además, se encontró que los cambios en la distancia horizontal desde la pared final fueron más significativos que el cambio vertical para el trayecto analizado.

Además según (Turri, 2014), presenta una estrategia de control, donde se utiliza la programación dinámica para el cálculo de los perfiles de velocidad óptima aprovechando un enfoque de control predictivo del vehículo en tiempo real.

Así mismo (Van De Hoef, Johansson, & Dimarogonas, 2015) formularon un problema de optimización que combina estos planes por pares en un plan general para una gran cantidad de camiones por despacho. Se estudió cómo se pueden calcular los perfiles de velocidad óptima de combustible por despacho de camiones. Se consideró un modelo de combustible de primer orden y se derivaron planes óptimos por pares. El método utilizado se evaluó con simulaciones de Monte Carlo. Se demostró un plan para miles de camiones y ahorro de combustible.

En el 2018 (bajo la misma autoría) (Van De Hoef, Johansson, & Dimarogonas, 2015) consideraron una configuración en la que cada camión de x flota cuenta con una

ubicación de inicio, un destino, una hora de salida y una fecha límite de llegada desde un nivel de planificación superior. El modelo consistió en rutas y perfiles de velocidad que permitirían que los camiones llegaran dentro de los plazos de cargue. De este modo, los camiones pueden reunirse en partes comunes de las rutas y formar pelotones, lo que resulta en un menor consumo de combustible.

En los últimos años, se ha realizado una considerable investigación sobre la optimización de los planes de mina a cielo abierto a largo y corto plazo para maximizar el valor presente neto de un proyecto minero dado. El objetivo típico de los modelos de asignación de camiones en la literatura es minimizar el número de camiones necesarios para alcanzar el objetivo de producción durante un período operativo determinado o maximizar la producción en función de los camiones y palas disponibles según lo expuesto por (Gurgur & Uzuner, 2011).

Por su parte (Bakhtavar & Mahmoudi, 2019), desarrollaron un enfoque basado en escenarios de optimización robusta (SBRO) para resolver el problema de la asignación de pala - camión problema (TSA). Con este fin, formularon el problema TSA (Asignación camión-pala) en dos fases mediante el uso de los conceptos del enfoque SBRO, análisis de red y el problema del camino más corto, y la programación entero binario bajo incertidumbres. Considerando que las incertidumbres en la producción de la pala y capacidad de la trituradora de la primera fase y el número de camiones disponibles a partir de la segunda fase basada en el enfoque SBRO. Este enfoque TSA es aplicable en todas las minas a cielo abierto donde se utilizan camiones con capacidades diferentes, y existen diferentes caminos entre la carga y puntos de vertido. Ejemplificaron la aplicabilidad del enfoque basado en un conjunto de datos de una mina de cobre. También compararon los resultados del enfoque SBRO con la corriente de TSA de la mina estudiada. Entonces, actualizaron la formulación TSA basado en dos nuevas estrategias para incrementar el número y la capacidad de la pala. En comparación con la estrategia tradicional de la mina, la producción de palas aumenta a 6719, 10,000 y 12.500 toneladas / turno por el enfoque SBRO basado en las estrategias de los equipos disponibles, aumentando el número de palas, y el aumento de la capacidad de las palas, respectivamente, además, disminuye los costos operativos por tonelada de mineral basado en las estrategias.

(Ozdemir & Kumral, 2019), definen que los camiones y palas son el equipo más utilizado en la industria minera, y su uso son indispensables en una actividad minera. Cuando se produce un problema en un equipo determinado, la productividad del otro equipo también se ve afectada. Es decir, los tiempos de espera de pala, colas de camiones y los racimos en las carreteras, y los problemas de capacidad en las trituradoras son experimentados de manera tal que se genera un déficit en los costes directos o de oportunidad.

(Upadhyay, 2016) plantea que el enfoque robusto no solo es un escenario directo a la solución de las asignaciones de una flota de camiones que se manifiesta con consideraciones de largo plazo. Las decisiones óptimas con respecto a la asignación de palas y camiones, en consideración al cronograma de producción a corto plazo, son muy importantes para mantener las operaciones en línea con los objetivos planificados de la compañía a largo plazo. En este documento se presenta un modelo de programación de objetivos lineales enteros mixtos (MILGP) para optimizar las operaciones basadas en cuatro objetivos deseados de la empresa, maximizando la producción, minimizando las desviaciones en el grado de carga, minimizando las desviaciones en el suministro de tonelaje a las plantas de procesamiento de la alimentación deseada, y minimizando el costo operativo.

Por otro lado, con el fin de maximizar la alimentación deseada, (Bakhtavar & Mahmoudi, 2019), proponen un sistema de envío de dos etapas para extender la utilización de los sistemas de camión-pala. En la primera etapa, las flotas de camiones y excavadoras se dividen en sub-flotas para trabajar en la fosa específica por un método de optimización basado en la simulación que considera las incertidumbres en la operación minera. En la segunda etapa, los camiones se envían simultáneamente a las palas en la boca por la programación lineal. Factor de coincidencia también se rastrea en la segunda etapa como una medida de la compatibilidad de las flotas. En las minas de superficie que consisten en más de un hoyo, los camiones pueden ser reasignados a otra fosa durante la operación para manejar los factores altos de coincidencia para todos los pozos. El enfoque propuesto se prueba en una mina. Se compararon las cantidades de mineral y producción de residuos del sistema de despacho anterior y el marco propuesto, la cantidad total se incrementó con el marco propuesto por 9,4% en un cambio que corresponde a 6.000 toneladas de material. El

enfoque tiene un gran potencial para aumentar la productividad de los sistemas de la carretilla y pala.

De la misma forma, (Nageshwaraniyer, Meng, Maghsoudi, & Dessureault, 2013), presentan como propuesta un enfoque robusto de optimización basado en simulación para los sistemas de pala de camión en minas de carbón de superficie para maximizar el valor esperado de los ingresos obtenidos de los trenes de los clientes. Los factores encontrados en las operaciones de manejo de materiales que pueden afectar la solidez de estos ingresos se clasifican en controlables, incontrolables y categorías constantes.

El trabajo de investigación presentado por (Araujo, 2018), plantea una simulación previa para poder contrastar con la realidad de la operación a fin de evaluar la alternativa viable, logrando optimizar el proceso y por ende reducir los costos. Para los cuales tomaron datos de campo como el estudio de tiempos y demoras operativas en el proceso de transporte y acarreo de mineral y desmonte.

La información obtenida en campo fue usada para determinar el tiempo total del transporte y carguío de mineral y desmonte la cual mediante análisis y ajustes se logró determinar diversos modelos y cálculos para el dimensionamiento de la flota de camiones.

De los resultados obtenidos se logró determinar un modelo el cual se aplicó a la realidad de la mina donde se realizó el estudio logrando una reducción significativa de los costos a 0.57 \$/TM.

La tesis presentada por (Natividad, 2014) se resume en el pronóstico de la producción en las operaciones de los equipos de carguío y acarreo del turno día y noche en la mina Antamina, para los siguientes meses, donde se utiliza métodos estadísticos apoyados con el método de Montecarlo secundado con el programa SPSS y comparándolos con los resultados del *Dispatch*. La data reportada por el *Software Dispatch* se utiliza para pronosticar los índices de rendimiento relacionados con los equipos de acarreo y carguío de una operación minera a cielo abierto.

Tener un sistema pala-camión, es decir un trabajo conjunto de estos equipos, en la minería a cielo abierto adquiere importancia en el proceso de producción, por lo cual se han desarrollado constantes avances tecnológicos que han apuntado a darles más

independencia, alcanzar mayores volúmenes de carga y a disminuir el consumo energético y el gasto de combustible, todo esto con el fin de conseguir un mejor rendimiento económico en la mina.

Por su parte (Czaplicki J. , 2014), provee ciertamente los análisis sometidos a la explotación en tajo abierto con un sistema pala-camión usando modelamiento, análisis de rentabilidad del camión, la existencia de transporte de reserva, servicios de reparación, posibilidades de ocurrencias de falla en el equipo, una cantidad de parámetros que alteran todo sistema determinismo, obviamente las probabilidades de que sea efectivo no solo dependerán de 83 revisiones que tradicionalmente no evolucionaron en la aplicabilidad de sistemas estadísticos avanzados. La trayectoria y el juzgamiento de este sistema solo pueden ser aplicables a la época que compre la década de los 60 a los 90 donde el sistema de explotación determinaba su rentabilidad con las condiciones de tecnología de la época. Todas estas variables no son tenidas en cuenta en la actualidad ya que entorpecen la labor operacional de un sujeto en pro de la mayor eficiencia de una máquina, liquidando sus experiencias solo para cumplir estándares quiméricos.

Por otro lado, resulta de interés la propuesta de (Olivares, 2011) ya que esta busca identificar los factores y prácticas operacionales de mayor incidencia en el rendimiento de camiones y palas (equipos productivos), y realiza un análisis de las prácticas operacionales del sistema pala-camión buscando cuantificar las correlaciones entre estas prácticas y como afectan la productividad del carguío y transporte. A través del análisis anterior se pretende mejorar el área de capacitación de Minera Escondida por medio de un modelo de gestión. El modelo tiene como objetivo la re instrucción planificada de operadores de carguío y transporte dando como resultado un aumento de la producción mina. Se consideró la información del sistema de despacho (Dispatch de Modullar) como herramienta comparativa del potencial de mejoramiento de los operadores. Se utilizó un periodo de 613 días de medición de modo tal de que los datos sean representativos. Se segregaron aquellas variables que mejor representaran las buenas o malas prácticas de los operadores. Para la operación de carguío se analizaron 4 variables: El rendimiento de la pala (en toneladas por hora efectiva), a través de un límite operacional que caracteriza a los valores demasiado bajos como fallas operacionales. Los tiempos de espera de arreglo de piso, arreglo de frente y traslado corto de la pala, a través de un límite operacional que caracteriza a los valores

demasiado altos de tiempos de espera como fallas operacionales. Para la operación de transporte se analizó como variable comparativa el tiempo que demora el camión en posicionarse en la frente de carguío. Se pudo probar que, en la medida en que el operador completa más circuitos por turno, el tiempo de posicionamiento tiende a ser menor. Por lo tanto, se utilizó un límite operacional, en función del número de circuitos por turno, que caracteriza a los tiempos de posicionamiento demasiado altos como fallas operacionales. La dependencia de las operaciones de carguío y transporte obliga a relacionar las variables en la comparación de operadores. La calidad de los posicionamientos del camión en la frente afecta la comparación de operadores de pala y la calidad de los pisos de las frentes de las palas afectan los tiempos de posicionamiento del camión. Esto permite organizar un plan de re instrucción objetivo. Finalmente se recomienda utilizar el modelo para más variables productivas, agregar variables de daño de equipo que inciden en los costos y considerar el uso de simuladores para una línea base de operación más detallada.

(Grimaldo, 2017) expone como se puede mantener la productividad, también llamada factor de eficiencia y eficacia. Indicando que bajo estas variables se encuentran los riesgos operaciones puntuales ofrecidos por los climas severos en la operación del Tajo vías resbaladizas, acumulación de agua, vías con anchos operativos sub estándar y tormentas eléctricas. De igual forma se analizan cuáles son los factores que inciden en la conservación de la productividad, tales como velocidades en vacío, velocidades con carga, pisos de palas inadecuados, paradas de seguridad, frentes de palas en mal estado, botaderos inadecuados para la descarga, etc.

La aplicación de sistemas totalmente automatizados para el despacho de camiones juega un papel importante en la disminución de los costos de transporte, que a menudo representan la mayoría de los costos gastados en la minería a cielo abierto. En consecuencia, la aplicación de un sistema de despacho de camiones se ha vuelto fundamentalmente importante en la mayoría de las minas a cielo abierto del mundo. Experiencias recientes indican que, al disminuir el tiempo de viaje de un camión y el tiempo de espera asociado de su pala asociada, debido a la aplicación de un sistema de despacho de camiones, la tasa de producción mejorará considerablemente, de acuerdo a la tesis planteada por (Ahangaran & Kaveh, 2012).

(Barrientos V. , 2014), realiza una tesis de grado en la cual plantea como metodología del estudio hacer una limpieza de los datos disponibles que corresponden a los cambios operacionales de un sistema pala-camión siguiendo restricciones físicas, luego un análisis exploratorio descriptivo y analítico modelando la relación entre las detenciones en estudio y la productividad diaria. Luego se realiza un modelo de simulación dinámica de eventos discretos que emula la realidad del sistema en estudio, el cual es validado y calibrado con la información que se tiene del sistema real. Los resultados indican que se observa que los días de mayor productividad son aquellos que poseen la menor duración de las detenciones en estudio, entre otros factores.

El modelo permite construir nuevos escenarios a partir del caso base, donde se agregan cambios operacionales ligados a agregar la posibilidad de que los camiones puedan realizar cambios de turno cargado, que se varíe la posición del estacionamiento respecto al triturador y el cambio del tipo de camiones. Los escenarios con cambio de turno con los camiones cargados y donde estacionamiento está más cercano a la trituradora aumentan la productividad diaria y disminuyen el total de las detenciones en estudio. Por otra parte, al cambiar el tipo de equipos de transporte hacia uno de mayor velocidad se logra que las detenciones disminuyan, mientras que un análisis en la productividad diaria no es posible de realizar debido a que es necesario cambiar la flota de transporte.

Finalmente se recomienda realizar la implementación de que el camión pueda realizar el cambio de turno cargado y además acercar el estacionamiento a la trituradora. El resultado de un escenario combinando ambas estrategias logra un aumento de un 4.2% en la productividad diaria y disminuye en un 10.6% la duración de las detenciones. Esto se traduce en un aumento del beneficio económico de 4.07 MUS\$ mensualmente. Con los resultados obtenidos se logró encontrar un escenario que aumenta la productividad, y en consecuencia, agregar valor a un sistema ya en funcionamiento, cumpliendo así el principal objetivo del estudio. Es posible completar un estudio de este tipo agregando más información detallada ligada a las detenciones estudiadas, pudiendo realizar análisis estadísticos específicos y el modelo de simulación pueda ser calibrado en base a estos datos.

Para alcanzar una optimización de un sistema de carguío y transporte se deben tener en cuenta las características del equipo al comprar, además de analizar el proceso del

ciclo del sistema. En su trabajo (Orosco, 2015), plantea que para optimizar los procesos dentro de un sistema es necesario describirlo y analizarlo adecuadamente: salidas del proceso, expectativas de los procesos posteriores intervinientes, secuencia de actividades, recursos e indicadores. Luego se debe definir, ejecutar y evaluar los procedimientos de trabajo. Una vez creado un ciclo de actividades del proceso ya establecido se pueden buscar posibles mejoras. Las chancadoras de Mina Lagunas Norte (mina en la cual se realizó el trabajo) se diseñaron bajo ciertas características del mineral y se construyeron para una producción de 42,000 tpd. Paralelamente, se compraron camiones y equipos de carguío cuyas características y productividad estaban acorde a esta necesidad. La coyuntura de los precios de los metales y otras necesidades llevaron a que se rediseñe todo el proceso de chancado procediendo a aumentar su capacidad a unas 63,000 tpd, esto conllevó a que el acoplamiento de los equipos requeridos entre los sistemas de minado (carguío – transporte) y el de chancado se rompiera, convirtiéndose este último en un cuello de botella, también obligando a abastecer a chancadora con dos equipos de carguío generando demoras operativas. La expectativa del sistema de chancado es tener un flujo constante de mineral.

El trabajo hecho por el autor anteriormente mencionado expone bajo las condiciones descritas de “bajo acoplamiento entre los equipos” y “demoras operativas” estrategias viables que se desarrollaron y permitieron generar mejoras en los resultados; usando adecuadamente los recursos, reduciendo los costos (US\$/tm) y, por ende, optimizando todo el sistema de minado.

Por medio de su investigación (Overmeyer, Dreyer, & Altmann, 2010) plantean que el rendimiento y la eficiencia en las líneas de producción son fundamentales para las fábricas, por lo cual se focalizan en un método de minería de datos basado en la predicción y en la configuración de los sistemas de producción interrelacionados cíclicamente. Esto permite analizar e interrelacionar diferentes datos en el software y obtener resultados precisos para facilitar la toma de decisiones.

En la investigación desarrollada por (González, 2017) se dispuso de un modelo de bloques proveniente de un proyecto real el cual poseía el plan de producción de toda la vida de la mina, incluyendo periodos de extracción, fases a las que pertenecen y destinos de los bloques. De todo el proyecto se escogió un año de producción para el

cual se asignaron los equipos de manera manual y mediante el modelo, con el fin de comparar los resultados y planes obtenidos. De acuerdo a lo expuesto por (González, 2017), el modelo desarrollado puede asignar equipos con los que ya se cuenten (flota actual) como también decidir la compra de equipos nuevos.

Se obtuvo que los costos obtenidos por la asignación del modelo fueran inferiores que los resultantes en la asignación manual. Se realizaron diversos experimentos considerando equipos fijos para asignación, ingresos por toneladas y restricciones de área para la operación y para todos los casos se obtuvieron fluctuaciones en los tonelajes extraídos mes a mes que no son previstas en la planificación con movimientos diarios constantes. La presencia de estas actuaciones puede indicar que aún se pueden considerar un mayor número de variables dentro la planificación que pueden permitir construir planes más robustos con el fin de garantizar una operación confiable en términos de producción y alimentación a la planta.

Según la investigación realizada por (Biteus & Lindgren, 2017) el objetivo general de la misma es lograr identificar las estrategias para maximizar la capacidad de realizar tareas de transporte, con respecto al mantenimiento y minimizar los costos de averías del vehículo y los costos de las acciones de mantenimiento. El planificador de mantenimiento toma como entrada las preferencias del cliente y los plazos de tareas de mantenimiento donde la regla experta existente para el componente ha sido reemplazada por un modelo predictivo. En otra palabra, la planificación del mantenimiento de los camiones se ha realizado previamente utilizando planes cíclicos estáticos con conjuntos fijos de tareas de mantenimiento, determinados por el kilometraje, el tiempo del calendario y algunos modelos físicos basados en datos.

En este problema, la flota de vehículos consta de camiones y remolques que pueden estar desacoplados. Se debe atender a un conjunto de clientes y solo se puede acceder a algunos de ellos mediante el camión sin el remolque. Esto da lugar a la planificación de rutas de camiones y remolques que contienen sub rutas exclusivas para camiones, además de rutas exclusivas para camiones. Lo anterior es lo expuesto en la tesis de (Parragh & Cordeau, 2017) en la que se propone un algoritmo de sucursal y precio para el TTRPTW, utilizando mejoras específicas del problema en el esquema de precios y cálculos alternativos de límite inferior.

2.2.6 Optimización no determinista de minería a cielo abierto

La optimización de minería a cielo abierto se ha sintetizado en la aplicación de la toma de decisiones enfocadas a los problemas geológicos que se pueden presentar y las decisiones en torno a las variables operacionales como los tiempos muertos en la operación se ha estudiado en la minería metálica con gran relevancia, investigadores como (Bastos, 2013) plantea que el transporte de material es uno de los aspectos más importantes de las operaciones mineras a cielo abierto. El problema generalmente implica un sistema de despacho de camiones en el que las decisiones sobre las asignaciones y destinos de los camiones se toman en tiempo real para lograr un objetivo común, que puede ser la maximización del material transportado al final del turno. Esta tarea se lleva a cabo en un entorno estocástico con muchas incertidumbres, como la cantidad de material transportado, el tamaño de las colas de camiones formadas en palas y trituradoras y tiempos involucrados en el sistema. El cambio de turno, que involucra tiempo, es un tema crítico que debe abordarse en el despacho de camiones.

El cambio tecnológico cada vez encierra los modelos tradiciones en los sistemas de explotación a cielo abierto, en este caso la optimización estocástica justifico la factibilidad y viabilidad económica que se reflejó en el incremento de la flota de equipos, el cambio de sistema de transporte de mineral mediante fajas, el obsoleto sistema de distribución de volquetes que tiene el sistema x y la mala distribución de los volquetes para abastecer combustible, entre otros según lo plantado por (Olazábal, 2015). Cabe recordar que el Sistema de control de Mina Modular es un sistema de una tecnología 20 años atrás

A través de su investigación (Newman, Rubio, Caro, Weintraub, & Eureka, 2010) plantean que las aplicaciones de programación lineal en minería son extensas y abarcan diferentes ámbitos de la mina: operación, planificación, selección de equipos, etc. En particular, muchos modelos de selección de equipos y de rutas utilizan optimización para determinar las flotas y la ubicación en la cual operan.

(Sepulveda, 2012) en su artículo tuvo como objetivo desarrollar modos o sistemas de planificación para el aumento de la productividad minera en pro a la disminución del riesgo y la incertidumbre del proceso de planificación minera, debido a la exclusión de

éstos a la hora de proyectar una evaluación de planeamiento por parte de las herramientas determinísticas que se emplean en Colombia.

Plantearon como metodología establecer a partir del problema de optimización que se tiende a presentar en la minería en base al planeamiento, cuya solución se dará a partir de programación lineal, programación entera o programación estocástica. Se realizaron distintos análisis logrando implementar el sistema en diferentes escenarios, teniendo como resultado que los diferentes tipos de programación beneficiarán en gran manera a la mina que decida implementarlo.

(Quiquia, 2015) presentó una tesis que se titula "Mejoramiento continuo en la gestión del ciclo de acarreo de camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro Verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapacay y Pucamarca" con la cual busca minimizar los costos de camiones gigantes, los cuales tienden a ser de los más altos con respecto a otros, y esto se hará minimizando los tiempos muertos para obtener una utilización alta, y una productividad aceptable respecto al costo del equipo.

El autor se basa en el hecho de analizar y plantear, mas no de dar una solución de manera certera, no busca brindar desarrollos sino describir su problemática en base a la problemática de aumento de costos por acarreo y el beneficio que se generará si se reducen estos costos.

Para finalizar el principal problema consiste en determinar las decisiones de expansión o contracción de algunos escalones considerando la variabilidad de la demanda. El problema se formula como un modelo estocástico de dos etapas. Las decisiones de la primera etapa son estratégicas, mientras que las decisiones de la segunda etapa son tácticas según lo manifestado por (Escobar, 2013).

Para finalizar, estos antecedentes son precursores en esta investigación ya que permiten el reconocimiento de los datos que pueden establecer el conjunto de los parámetros o fenómenos cuyo comportamiento desarrolle en el tiempo la mejor probabilidad para la toma de decisiones en la planificación minera. Dentro de los tiempos perdidos o muertos encontrados en la literatura que corresponde a: personal, el cargue y el acarreo de material ya que incluyen la probabilidad como un análisis independiente de diversas situaciones y sumado a ello el factor externo

(incertidumbre). Por otro lado, este análisis de literatura permitió corroborar que el sistema pala-camión permitirá dentro de su curso operacional la entrada de datos para la generación de probabilidades que permitan un mejor flujo entre el tiempo y el dinero en la operación.

Entonces ¿cómo es posible conocer el rumbo de una operación minera estocásticamente? Un solo ciclo de producción en minería a cielo abierto utiliza operaciones unitarias que generalmente involucran perforación, tronadura, cargue y transporte y dichas operaciones necesitan de equipos auxiliares que ayudan a mantener el rendimiento de la operación. La respuesta está en que las decisiones de la primera etapa son estratégicas, mientras que las decisiones de la segunda etapa son tácticas. Asignar y despachar los camiones de manera eficiente es un factor que permitirá la capacidad de estimar las medidas de rendimiento del sistema para fines de planificación, el problema actual en cuanto a maquinaria es que proporciona un marco para clasificar varios problemas que puedan ser nuevos desde la planificación del transporte y así mejorar aún más estas nuevas técnicas que resumen en requerir detalladamente de cada camión el itinerario y disponibilidad.

El resultado de todos estos antecedentes es el control a la planificación de la operación dependiendo en primera instancia del plan de producción que básicamente es el resultado final de dicha planificación. Responder a la pregunta de dónde debe ir un camión para que el objetivo de producción se logre con un costo operativo mínimo, cuál puede ser el clima que menos afecte el transporte, precio de la materia prima, estudio geológico etc. y dentro de ellas un conjunto de incertidumbres que también caracterizan y priorizan las fuentes de incertidumbre.

Otra de las incertidumbres que se utilizó para determinar las primeras probabilidades fue el tiempo de espera de cargue de los camiones, este tipo de interferencias es una fuente principal de tiempos muertos que aumenta el costo operacional, a donde debe dirigirse el camión y cuál es la espera en descarga por si otros camiones también están en el mismo proceso; como el segundo caso permiten el desarrollo de eventos discretos de flujo de camiones, un enlace que corresponde al punto de carga y descarga, y la segunda unidad se mueve entre el primer enlace y el punto de su destino.

La incertidumbre se reduce conociendo la disponibilidad y rendimiento en operación del equipo. Por otro lado también es importante resaltar que el consumo de combustible como el tiempo de transporte en situaciones de fuerza mayor influyen en los costos de transporte de los camiones mineros, en este estudio se propone e ilustra una estrategia de gestión energética basada en la optimización de la velocidad en un camión minero eléctrico híbrido en serie.

Varios de los antecedentes como las optimizaciones de estos sistemas entre equipos de cargue y acarreo están bajo el tipo de minería polimetálica, estos modelos estimados son reflejo de los planes de producción posibles generados por los simuladores que permita obtener x planes de producción posible congruente con x simulaciones de entrada cada una diferente. De todas estas simulaciones (antecedentes posibles) también habrá un plan ganador.

En el capítulo que veremos a continuación se realizara una descripción de la metodología utilizada en la investigación que permitió el cumplimiento de los objetivos específicos para obtener los resultados esperados, definiendo el enfoque se utilizó en el presente documento.

3. MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe la metodología utilizada que permite obtener los resultados de este trabajo, los cuales se presentan a continuación. De acuerdo a lo expuesto por (Sampieri, 2014), se usan métodos de los enfoques cuantitativo y cualitativo y pueden involucrar la conversión de datos cuantitativos en cualitativos y viceversa, por tal motivo se considera que la presente investigación cuenta con un enfoque de investigación mixto debido a que durante el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos se mantendrá interacción con el personal a cargo del proceso. Por otra parte, se llevará a cabo la recolección de datos cuantificables, para posteriormente realizar un análisis de estos.

La presente investigación enmarca su enfoque en el tipo mixto buscando por medio del uso de fases definidas, una de ellas que corresponde a la investigación descriptiva y otra enfocada a la investigación propositiva (Creswell, 2009) para dar respuesta a los objetivos específicos trazados.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se realiza el desarrollo investigativo abordando cada una de las fases definidas de la siguiente manera en la Tabla 3-1 a continuación expuesta:

Tabla 3-1. Fases para el desarrollo de la investigación.

Fase	Descripción
Investigativa	
Investigación Descriptiva	<ul style="list-style-type: none"> a. Revisión bibliográfica del uso de modelos para optimización de sistemas pala-camión en minería a cielo abierto. b. Identificación de Variables claves. c. Identificación de métodos requeridos.
Investigación Propositiva	<ul style="list-style-type: none"> a. Diseño y validación del modelo de simulación del modelo a utilizar b. Implementación de modelo de optimización.

Fuente: Elaboración propia

3.1 Investigación descriptiva

Se plantea a través del desarrollo de la presente fase en la investigación el uso de información primaria y secundaria, con el fin de identificar con claridad cada una de las características necesarias de los modelos que se busca implementar al interior de un complejo minero en el que se lleva a cabo el proceso de extracción de carbón a cielo abierto.

Con el fin de llevar a cabo lo anteriormente expuesto se propone el desarrollo de las siguientes actividades:

3.1.1 Revisión Bibliográfica

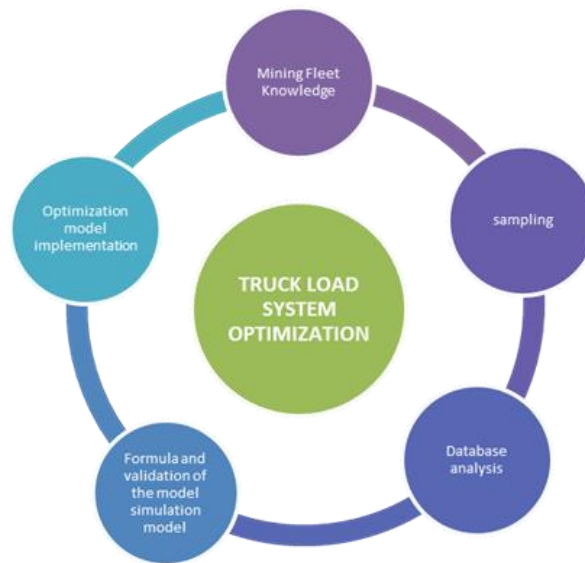
Se realizará una búsqueda bibliográfica profunda de literatura existente con el objetivo de identificar de métodos más utilizados para llevar a cabo la planeación de procesos mineros, tanto aquellos conocidos como convencionales como los estocásticos, esto, a través de las herramientas tecnológicas dispuestas por la Universidad Nacional de Colombia o por medio de motores de búsquedas de información con los que se cuenta de forma externa.

3.1.2 Estructura Metodológica

Para determinar en el sistema de cargue y transporte de una explotación a cielo abierto los posibles factores que inciden en el retraso de la operación, se realizará un análisis detallado del proceso de cargue y acarreo con los módulos (matches) en los que se involucran los camiones objeto de estudio para ser sometidos a medición del tiempo del ciclo de cargue y acarreo de material estéril, tiempos los cuales se almacenarán y filtrarán en una base de datos.

Los procesos que involucran el desarrollo del proyecto están orientados a la optimización del rendimiento de la flota, y se dividen de acuerdo con las lineamientos de investigación cuantitativa para obtener resultados lo más exactos posibles dirigidos al análisis y la toma de decisiones de la empresa como se observa en la Figura 3-7.

Figura 3-7 Modelo Metodológico del Proyecto.



Fuente: Elaboración propia

3.1.3 Identificación de Población.

La población objeto de estudio estará conformada por los equipos de cargue y acarreo que operan en una mina a cielo abierto, usados para el transporte del material estéril. Como se observa en las Figura 3-8 y Figura 3-9

Figura 3-8 Equipos de cargue de estéril



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-9 Equipos de acarreo de estéril.



Fuente: Elaboración propia

Iniciando con la identificación de la flota minera como se observa en la Figura 3-10, realizando la ruta diaria a través de los sectores escogidos para el estudio (A y CD), con la finalidad de observando cómo se componen los matches (módulos) y sus principales características.

Figura 3-10 Excavadora Hitachi EX3600 cargando camión Hitachi EH4000 mientras que camión CAT 793D espera y Buldócer D10T en espera para arreglar la plaza.



Para la construcción de un match, las capacidades máximas y efectivas del balde del cargador y del camión minero son de vital importancia, ya que estos factores nos delimitaran el número pasadas que se necesita realizar para que el camión realice un

viaje con su capacidad máxima disponible y así sea rentable la operación. Ver Tabla 3-2 Combinaciones o matches existentes..

Al momento de conformar la flota para la operación de una faena el match pala-camión es un concepto que se analiza en profundidad: “al seleccionar un camión, al mismo tiempo se está diseñando en la mina, el ancho del camino, etc. y eso también tiene relación con la elección del equipo de carga, la capacidad de balde, buscando obtener menos pases entre una pala y un camión para transformar el proceso en algo eficiente¹. En la Tabla 3-2 se relacionan los matchs presentes en la mina y su productividad como el caso del match EX600/EH4000 cuya productividad sería de 174. Ver Anexo 1.

Tabla 3-2 Combinaciones o matches existentes.

MATCH	PRODUCTIVIDAD Pdtv (bcm/h)
CAT6060/793D	203
EX3600/793D	163
EX600/EH4000	174
RH120-E/789C	156
EX2500/789C	133
EX1900-6/777F	89
EX3600/789C	145
EX3600/EH3500	143
RH120-E/777F	76

Fuente: Elaboración propia

3.2 Modelo propuesto

En esta sección se describen las componentes principales del modelo de optimización como los parámetros que posee y la lógica interna de los equipos.

3.2.1 Dinámica operacional del sistema de Acarreo.

Se define un objeto como cada uno de los elementos que existe dentro del modelo, por lo que para el caso de este trabajo se dividen en equipos, frentes y locaciones. Dependiendo del tipo de objeto se define un estado operacional, que es la situación en

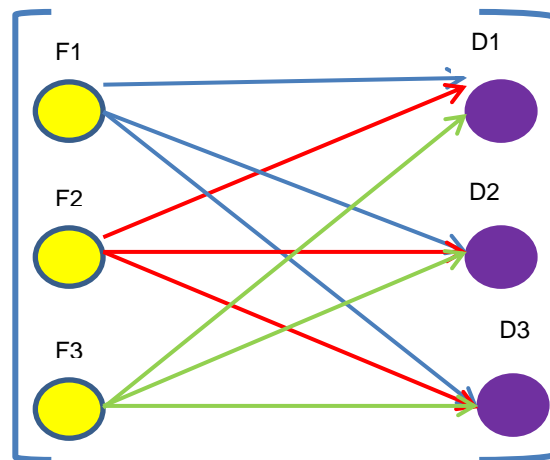
¹ Grandes Camiones y Palas: Un match que apunta a un mayor rendimiento. Revista Minería Chilena. <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/grandes-camiones-y-palas-un-match-que-apunta-a-mayor-rendimiento/>

que se encuentra cada objeto. Estos estados se encuentran totalmente definidos si las siguientes características están designadas:

- a. Maches: En el caso de los equipos basta conocer la combinación de equipo o modulo generado.
- b. Frentes (origen (F_n)): En el caso de las frentes, basta saber si tiene un equipo de carguío asignado.
- c. Destinos (D_n) : En el caso de las locaciones se requiere saber si existen equipos presentes en el lugar.

Por otro lado, los eventos operacionales se definen como sucesos que provocan que el estado operacional de los equipos cambie. Los eventos pueden ser fallas del equipo, cambio de turno, colación, cumplimiento del plan en el frente de extracción y la finalización del plan. Figura 3-11.

Figura 3-11 Esquema de sistema de transporte planteado



Fuente: Autor del proyecto

3.2.2 Parámetros operacionales

Los parámetros operacionales son datos que describen alguna propiedad de un proceso. Dichos parámetros pueden ser valores fijos o estar relacionado a distribuciones. Los parámetros operacionales utilizados en este trabajo se describen a continuación:

- i. Factor de carga: Cantidad de material que el equipo de cargue carga en el camión.
- ii. Tiempo de carga: Tiempo que el equipo de cargue emplea en cargar el camión. No incluye tiempos de aculatamiento ni esperas una vez posicionado el camión.
- iii. Tiempo de aculatamiento carga: Tiempo que emplea el camión desde que entra al área de carga hasta posicionarse en el punto de carga. No incluye las demoras por detenciones al realizar la trayectoria ni los tiempos de cola.
- iv. Tiempo de descarga: Tiempo que emplea el camión en descargar su carga actual. No incluye tiempos de aculatamiento en descarga.
- v. Tiempo de aculatamiento descarga: Tiempo que emplea el camión desde que entra al botadero de descarga hasta posicionarse en el punto de descarga.
- vi. Tiempo de viaje: Tiempo de viaje entre el frete de carga y botadero. Se distingue entre tiempos de viaje en estado cargado y vacío.

Teniendo la definida la estructura se identifican unos parámetros fijos y se determinan las variables para cada camión (i) dentro del sistema así:

- a. Distancia entre el origen y el destino: X (km) - constante para un recorrido.
- b. Matches. - constante para una combinación de módulos
- c. Tiempo de ida - T_{ti} (min): este tiempo relaciona las actividades de espera en pala (t_{ep}), aculatamiento en la pala (t_{ac}), cargue (t_c); en este trabajo los t_{ac} y t_c son considerados como constantes, mientras que el t_{ep_i} como un factor estocástico. Otro factor es el tiempo de viaje full T_{VF_i} el cual es el tiempo comprendido desde que el camión (i) termina su cargue e inicia su recorrido hacia el lugar de depósito del material que acarrea (ver Ecuación1).

$$T_{ti_i} = t_{ep_i} + t_{ac} + t_c + T_{VF_i} \quad (1)$$

El T_{VF} (ver Ecuación 2), el cual para esta investigación se consideró como aleatorio ya que existen diversos factores que lo pueden afectar. Entre los factores que afectan este tiempo están: estado de las vías, distancia vertical a recorrer, tipo de camión, capacidad del camión por cantidad de carga transportada, transito de equipos en la vía,

obstáculos en la vía, distancia entre sitio de cargue y depósito de material² representados por t_{x_i} . En la Ecuación 2 se considera un modelo para cada camión (i), con su respectivo tiempo de ida ideal (t_{ii}) el cual depende de la velocidad del camión y su posible variabilidad aleatoria (t_{x_i}).

$$T_{VF_i} = t_{ii} + t_{x_i} \quad (2)$$

d. Tiempo de regreso $T_{tr}(min)$: este tiempo es modelado mediante la ecuación 3 y relaciona el tiempo de espera en botadero (t_{eb}), tiempo de aculatamiento en botadero (t_{ab}), tiempo de botado (t_b); los cuales fueron considerados como constantes. Además del tiempo en que inicia su movimiento del área de depósito de material hasta su zona de cargue asignada T_{VV_i} , el cual al igual que T_{VF_i} se considera como un tiempo variable, por el número de factores que lo afectan (ver ecuación 4). A diferencia del viaje cargado, este presenta un decremento significativo en su duración, ya que son nulas o muy pocas las distancias verticales a recorrer, sumado a eso la velocidad del camión se incrementa al no llevar carga en su tolva, el resto de las variables como tráfico y estado de las vías, obstáculos y distancia entre el sitio de botado y de cargue siguen afectando ver Ecuaciones 3 y 4.

$$T_{tr_i} = t_{eb} + t_{ab} + t_b + T_{VV_i} \quad (3)$$

$$T_{VV_i} = t_{v_i} + t_{y_i} \quad (4)$$

Donde t_{v_i} es el tiempo de vuelta ideal y t_{y_i} su posible variabilidad aleatoria

3.2.3 Formulación del Modelo del sistema

Analizando la dinámica del sistema y relacionando los parámetro y variables del proceso se propone el siguiente modelo matemático para el tiempo total de ciclo T_{TC} para cada camión (i) que incluye los momentos del ciclo de transporte en la actividad minera de acarreo de material a cielo abierto (Ecuación 5).

$$T_{TC_i} = \left(t_{ep_i} + k_c + \frac{d}{v_i} + t_{x_i} \right) + \left(\frac{d}{v_v} + t_{y_i} + k_b \right) \quad (5)$$

Dónde:

- i. k_c representa t_c, t_{ac} (min)
- ii. k_b representa t_{eb}, t_{ab}, t_b (min)
- iii. d distancia entre origen y destino (Km)
- iv. v_i velocidad de ida (Km/h)
- v. v_v velocidad de vuelta (Km/h)

La optimización estará orientada a los factores que minimizan los tiempos de ciclo en función a t_{ep} , t_x y t_y , relacionados mediante la Ecuación (6):

$$(\min) T_{tc} = \sum c_i x_i \quad (6)$$

Al encontrar el tiempo de ciclo óptimo podemos Maximizar la productividad de nuestro sistema (Ecuación 7)

$$P_i = \sum \left[\left(\frac{c_{pc}}{T_{tc}} \right) * disc \right] \quad (7)$$

Dónde:

P_i : productividad del camión k en circuito $[i, j]$ [t/h].

C_{pc} : Carga promedio del camión k [t]

T_{tc} : Tiempo total del ciclo optimizado para cada camión

$disc$ = disponibilidad de cada camión

3.2.4 Interpretación de la incertidumbre operacional

En la presente sección se realiza una identificación de los tipos de incertidumbre operacional presentes en la minería a cielo abierto.

- a. Asociada a parámetros operacionales: corresponde a aquellos parámetros que tienen relación con tiempos, velocidades y capacidades de los componentes utilizados en la operación.
- b. Asociada a eventos operacionales: corresponde a aquellos que afectan a la efectividad de los equipos, como detenciones programadas y fallas operacionales. Para generar cierta aleatoriedad, tanto en la incertidumbre asociada a parámetros

como a eventos operacionales, se debe caracterizar la incertidumbre mediante estudios estadísticos de datos (Torkamani, 2013).

3.2.5 Construcción del Algoritmo

Según (Barranco, 2010) la presencia de múltiples objetivos en un problema, además de requerir de un método de resolución no convencional, da lugar a un grupo de soluciones óptimas conocidas ampliamente como soluciones óptimas de Pareto, cuyos pasos se pueden representar como se muestra en figura 3.12.

Más detalles sobre esta estructura se puede consultar en (Fuentes, 2017) quien describe en su investigación las etapas del proceso de un AEMO y define la importante de los problemas de optimización multiobjetivo es que tienen más de una solución óptima, por ello es importante decidir cuál de las soluciones óptimas satisface mejor las necesidades del problema atendiendo a criterios de experiencia e información disponible.

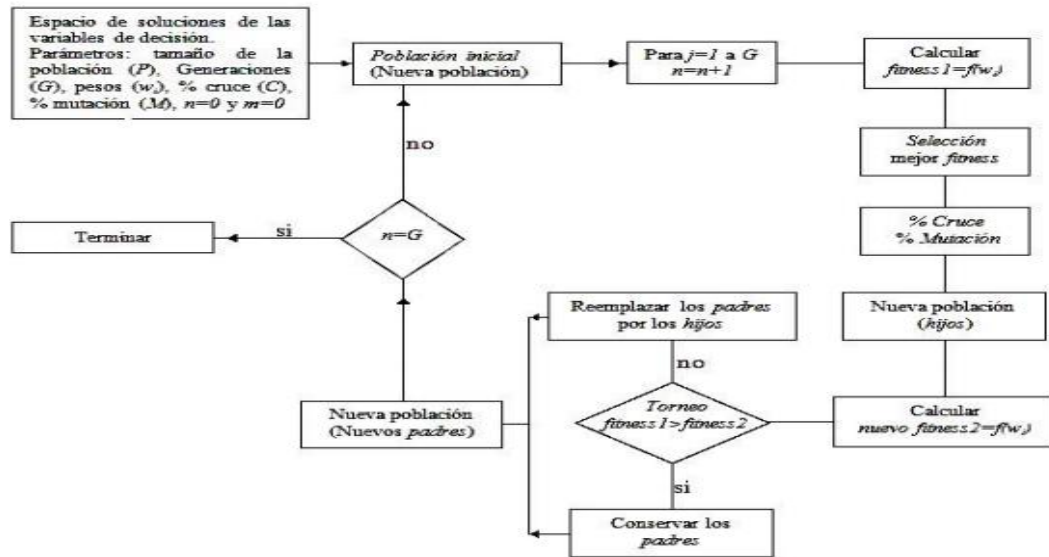
Los métodos evolutivos como la programación evolutiva, las estrategias evolutivas y los algoritmos genéticos (AG) son los más utilizados para estos casos debido a que tienen la ventaja de aplicar en modelos de alta complejidad que difícilmente tienen solución con metodologías matemáticas convencionales, porque pueden evaluar infinitas soluciones óptimas.

Según (Barranco, 2010) estos AG's son una representación simple de la evolución biológica, en la que un par de padres de una población de individuos demarcados en una generación (selección), dan origen a un par de hijos con características de los padres (cruzamiento). Los individuos que forman la próxima generación se escogen por torneo, en el que gana el que tenga mejor aptitud (fitness) con base en los criterios del evaluador, con lo que la optimización va evolucionando hacia mejores valores en las próximas generaciones. Antes de la evaluación del fitness, se estima un porcentaje pequeño de mutación con el que hay un probable cambio de alguna característica del individuo.

La aplicación de estos algoritmos evolutivos que son en esencia mecanismos de selección natural, han adquirido gran popularidad por ser métodos robustos y efectivos

para resolver problemas de optimización de una y múltiples funciones objetivos, permiten construir un grupo de soluciones óptimas a partir de la asignación de diferentes conjuntos de pesos de importancia para la función objetivo. Como se observa en la Figura 3-12.

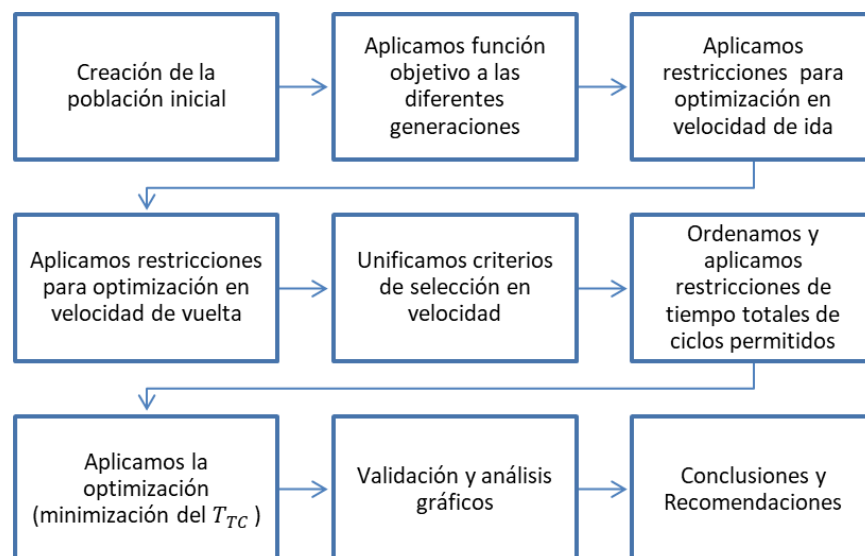
Figura 3-12.Diagrama de flujo del AG aplicando ponderación lineal



Fuente: Tesis análisis multiobjetivo para la optimización en sistemas (Barranco, 2010)

En la Figura 3-12 se muestra el modelo de simulación + optimización que se propone desarrollar en esta investigación.

Figura 3-13 Modelo de Simulación Optimización



Fuente: Elaboración propia.

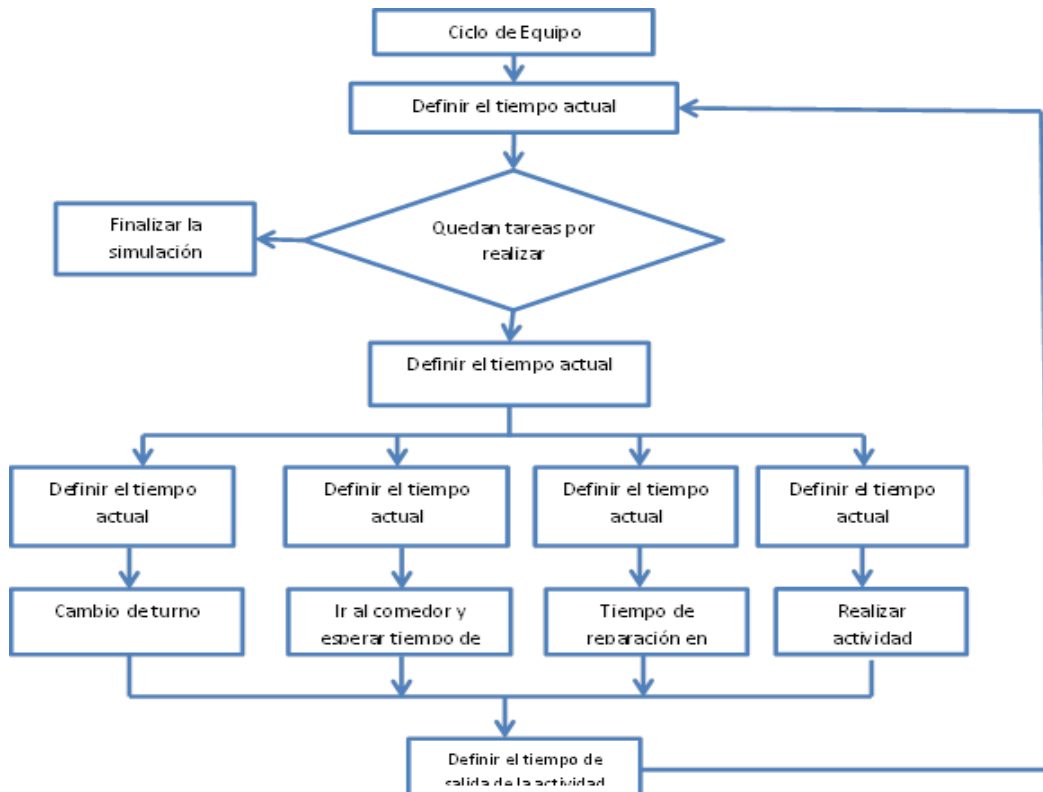
Esta estrategia nos permite analizar los puntos a lo largo de la frontera de óptimos de Pareto, solo se estructuraba algunos puntos considerando factores ponderados aplicados a las funciones objetivo esto definido según (Fuentes, 2017).

3.2.6 Caracterización de datos para el proceso de acarreo en una mina cielo abierto de carbón

o Lógica de equipos

Los equipos de simulación en operación corresponden a palas y camiones con base a la metodología propuesta por (Jara, 2018) se realiza la lógica de simulación de los equipos en una operación minera a cielo abierto, cuyo diagrama general se puede observar en la Figura 3-14.

Figura 3-14 Lógica general de equipos de simulación



Fuente: Elaboración propia

realizarla: en la plaza de cargue y sobre camiones mineros, por ende se vio la necesidad de implementar dos tipos de formatos como se observa en la Tabla 3 3 Formato para muestreo en campo Formato para muestro en plaza. Tabla 3 3 y Tabla 3-4. Ver Anexo 1.

Tabla 3 3 Formato para muestreo en campo Formato para muestro en plaza.

Date:		Sector:		Level:			
Flank:		Shovel:					
Fleet	Time (min)						
#	N° truck	Queue Load	spot Load	load	N° passes	Departure	arrival
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
comments							

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4 Formato para muestreo en camiones

Date:		Sector:		Level:		Flank:								
Fleet		Time (min)												
#	N° shovel	N° truck	Queue Load	Spot Time Load	Time Load	N° passes	payload	Travel F.	Queue Dump	Spot Time Mean	Time Mean	Travel E.	Departure	arrival
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
comments														

Fuente: Autor del proyecto

Teniendo definido las características del sistema y los parámetros operacionales se plantea el algoritmo evolutivo mono objetivo debido a que el comportamiento de nuestro sistema se comporta de manera lineal se planteó nuestra función objetivo y las restricciones del sistema así como las variables a optimizar, se procede en el próximo capítulo aplicar en un caso real nuestra herramienta propuesta con el fin de validar la efectividad del mismo

4. ESTUDIO DE CASO

En el presente capítulo se describen las características principales de un ejercicio de un caso real de aplicación en sistema pala camión de una mina a cielo abierto de carbón, donde se presenta la configuración física de la operación y sus componentes. Además, se detallan los inputs utilizados y siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 3, se muestran los resultados obtenidos.

4.1 Conformación de la Mina.

La mina de carbón de estudio se encuentra conformada según (Niño Carlos, Molina Sandra, 2014) principalmente por dos frentes de explotación, un Área para mantenimiento de equipos, el Área de trituradora CHF y áreas para la preparación de explosivos, y de oficinas y campamento para el personal interno del complejo. Los frentes de explotación de la mina de carbón, los cuales se encuentran divididos Niveles de explotación los cuales van en orden ascendente del 1 al 10 y 11 separados cada uno por su respectiva rampa, a su vez subdivididos en paneles de 50 metros comprendidos en sentido Nororientado – Suroccidente, cada 7 paneles conforman un nivel, estos frentes están conformados por:

Sector A: Localizado al Noreste del Área de concesión, teniendo como objetivo final un retro llenado, para su inicio se tuvo la necesidad de desviar el río Calenturitas. Los buzamientos de los mantos oscilan alrededor de los 38° en la parte occidental, entre los 10 y los 24° en el flanco central y entre 42° y 48° En el flanco oriental. Actualmente se encuentra activo y en avance por el nivel 10. Como se observa en la Figura 4-16

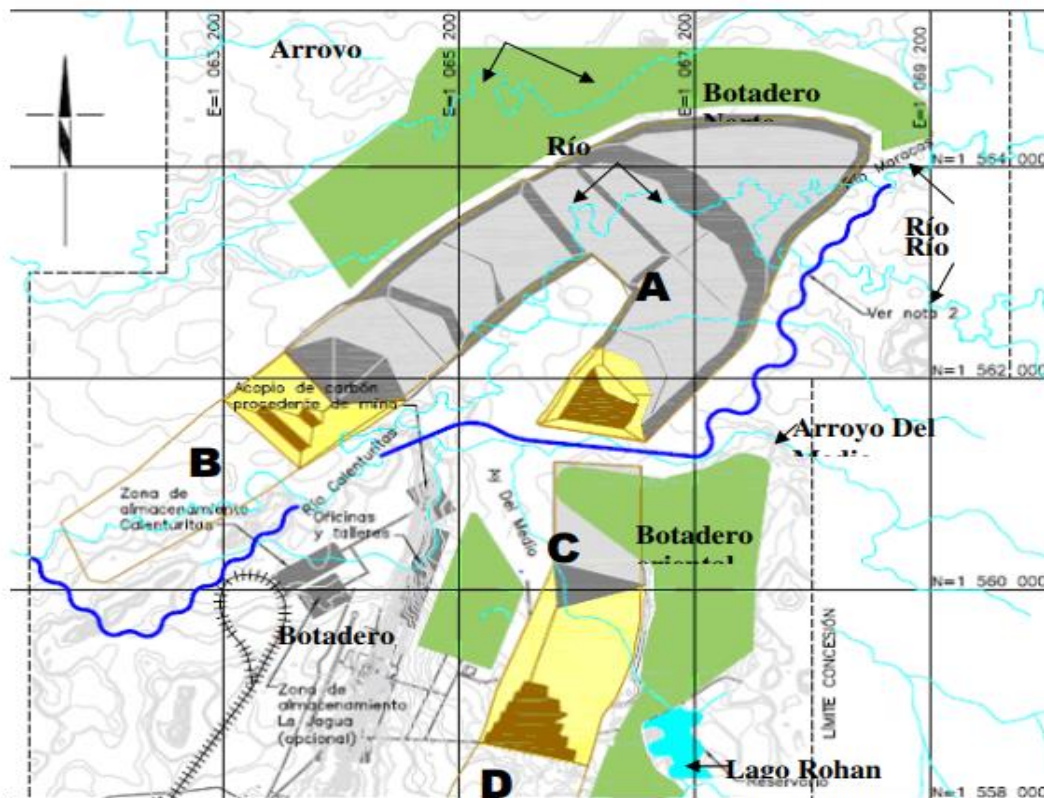
Sector B: Sector planeado para la explotación. Localizado al suroccidente del sector A, y al sur de la desembocadura del arroyo Del Medio en el río Calenturitas. Los buzamientos de los mantos en este sector oscilan entre 39° y 48° de Sur a Este con rumbo de Norte a Este. Ver Figura 4-16

Sector C: Este sector corresponde al flanco oriental de la estructura sinclinal y se localiza al sur del arroyo Del Medio, reanudando las actividades en este tajo desde el 2016. Los buzamientos promedios están entre 27° de Norte a Occidente con Rumbo

N25°E. Actualmente se encuentra en avance por el nivel 10 (conjunto con el sector D).
Figura 4-16

Sector D: Localizado al Sur del sector C, también formando parte del flanco oriental del Sinclinal, donde los estratos buzcan de 42°NW y Rumbo N10°E. Actualmente se encuentra en avance por el nivel 10 (conjunto con el sector C).Figura 4-16

Figura 4-16 Localización Sectores Mina



Fuente: Resolución No.0464 6 de marzo de 2009, ANLA.

4.1.1 Geología del Yacimiento.

Según (Niño Carlos, Molina Sandra, 2014) a nivel regional afloran los sedimentos de las formaciones que de la base a techo son: Barco, Cuervos, La Cuesta y Depósitos Cuaternarios. En el área del proyecto, Mina Calenturitas se encuentran las rocas de la formación Barco y las arcillolitas de la formación Cuervos, junto con depósitos cuaternarios aluviales cuyo espesor se estima menor a 5 metros. La formación de

interés corresponde a Cuervos, por ser la poseedora de los mantos de carbón con valor económico, habiendo identificado 32 mantos, siendo el C410 el primero en la secuencia estratigráfica y el C200/C199 los últimos.

4.1.2 Método de Explotación.

El diseño minero de explotación evaluado para el depósito es el de tajo abierto con botadero externo y retrolleado, con banqueo descendente a través de sucesión de escalones que permiten ejecutar los frentes de avances, realizándose en sentido del rumbo de los mantos, con alturas de bancos de 4 a 8 metros, usando excavadoras de tipo frontal y retro y camiones diésel con botadero externo para profundidades menores a 100 m y retrolleado para profundidades superiores a 100 m según (Niño Carlos, Molina Sandra, 2014).

El método minero es de pared alta a pared baja, en el cual la pared baja constituye el plano de avance semi-paralelo al plano de los mantos de carbón, mientras que la pared alta corta estos mantos y constituye una pared final de avance³.

El objetivo principal de este ejercicio consiste en determinar el comportamiento de Sistemas pala camión escogidos que los hemos llamados Match, donde se tiene pocas variables, de manera poder establecer comparaciones entre los mismos a modo de determinar cuál de ellos posee mejores rendimientos e índices operacionales.

4.2 Clasificación y Procesamiento y de Datos

El caso de aplicación busca estimar el ciclo óptimo de la operación con la finalidad de maximizar la productividad de cada match (combinaciones en el sistema pala camión) y comparar los resultados. En este caso se considera la utilización de 12 posibles combinaciones (match) que corresponde a 840 muestras de datos como se observa en la siguiente Tabla 4-5

³ ANLA, Resolución No.0464 6 de marzo de 2009. Por lo cual se modifica un plan de manejo ambiental y se toman las siguientes determinaciones.

Tabla 4-5 Total Muestras

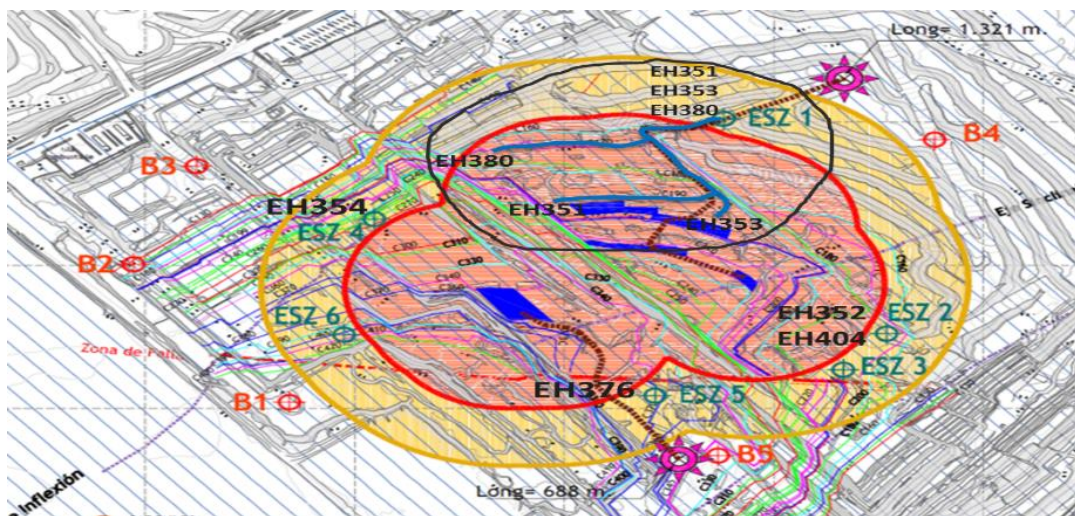
TOTAL MATCHES SIMPLE			
MACHT	CANTIDAD DE COMBINACIONES	MACHT	CANTIDAD DE COMBINACIONES
CAT 6060/789C	68	EX3600/793D	41
CAT 6060/793D	23	EX3600/EH3500	179
EX1900/777F	8	EX3600/EH4000	24
EX2500/789C	1	RH120-E/777F	17
EX3600/ EX3600/777F	3 203	RH120-E/789C	4
EX3600/789C	264	RH120- E/EH3500	4

Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Selección de sectores y cálculos de distancias

Para la investigación se escogió dos sectores en la mina nombrados como A y CD, en la Figura 4-17 se mostrara la configuración espacial de cada una de los componentes que lo conforman y los equipos que habitualmente está a signados a cada uno de estos sectores.

Figura 4-17 Configuración espacial del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Se considera además que cada frente de carga posee material estéril para cargar y que los equipos de carguío se mantendrán en ese frente durante toda la simulación, la cual como se trata del corto plazo corresponde a 24 [h]. Se realizó una estimación de distancia recorrida dependiendo al viaje, para la distancia de ida determinamos que el camión debería ir a una velocidad de 15 km/h y se tiene el tiempo de recorrido, de igual manera para la distancia de regreso, la velocidad tenida en cuenta fue de 40 km/h por medio de este procedimiento logramos la aproximación entre el punto de origen y destino. Teniendo el análisis de datos. Las distancias entre frentes de carga y descarga dadas por el plan a simular se pueden observar en la **Tabla 4-6**Tabla 4-6. Ver Anexo 1

Tabla 4-6 Distancia entre frente de carga y descarga

DISTANCIAS ENTRE FRENTE DE CARGA Y DESCARGA			
Combinación origen - destino	Distancia (km)	Combinación origen - destino	Distancia (km)
c130 +52Rohan +120	2,06	c210 -136RTLA+20	4,36
c140 -28RTLA +65	3,70	c220 -140RTLA+40	2,95
c180 +52Rohan +120	3,02	c270 +48Rohan +120	2,92
c180 +56Rohan +120	2,49	c270 -52RTLA +60	3,47
c180 -116RTLA+25	3,15	c300 -4Rampa +120	3,63
c180 -120RTLA-60	2,45	c310 -64SA_OCC+120	3,11
c200 +4Rampa +120	3,70	c330 +48Rohan +120	3,35
c200 -128RTLA+25	3,32	c330 +56Rohan +120	2,38
c200 -136RTLA+20	4,05	c340 -36Rohan +120	3,66
C200 -140RTLA-40	4,05	c350 -36Dique +90	4,56
c210 -128RTLA+25	3,70	C360 -124RTLA-40	4,72
c210 -132RTLA 0	2,73	c360 -36Rohan +120	3,75
c360/LODO -68RTLA -60	3,97	c360 -40Rampa +70/+60	2,15
c370 +4Rampa +120	4,04	Rampa -40Rohan +120	4,82
c370 0SA_OCC+120	3,13	Rampa 7RTLA +65	3,13
c370 -36Dique +90	4,48	REMANEJO -116RTLA+40	2,33
c370 -4Rampa +120	4,06	REMANEJO 380 -16Rampa +120	3,13
c410 -4SA_OCC+100	3,88	c200 -128RTLA+70	4,04
c420 -8SA_OCC+120	3,83	c210 -136RTLA-40	4,69
INT400/380 -36Dique +90	5,69	INT400/380 -36Rohan +120	4,17
LIMPIEZA -4SA_OCC+82	3,06	r210 -128RTLA+70	4,57
lodo -33RTLA +65	3,13	METEORIZADO	
		+32SA_OCC+120	3,72

(Continuación) Distancia entre frente de carga y descarga

Combinación origen - destino	Distancia (km)	Combinación origen - destino	Distancia (km)
METEORIZADO +24SA_OCC+120	2,80	c410 -4SA_OCC+120	3,65
METEORIZADO +32RTL+40	4,56	c410 -4SA_OCC+82	3,35
r210 -128RTL+25	3,78	c360 -40Rohan +120	5,21
c270 -52RTL - 80	3,30	c350 -36Rampa +70/+60	4,09
		c220 -140SA_OCC+120	6,06

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Organización en Base de Datos.

Paralelamente a la toma de muestras se desarrolló una base de datos que contiene toda la información de los tiempos recolectados durante el proyecto, en la que estos se calculan las productividades actuales por flota y organizar toda la información de los ciclos para ser filtrada por criterio de desviación estándar en la espera y cargue, en donde las muestras producto del filtro se utilizarían para compararlas con los planes semanales como se observa en la Tabla 3-7. Ver Anexo 1

Tabla 3-7. Base de datos de tiempos recolectados

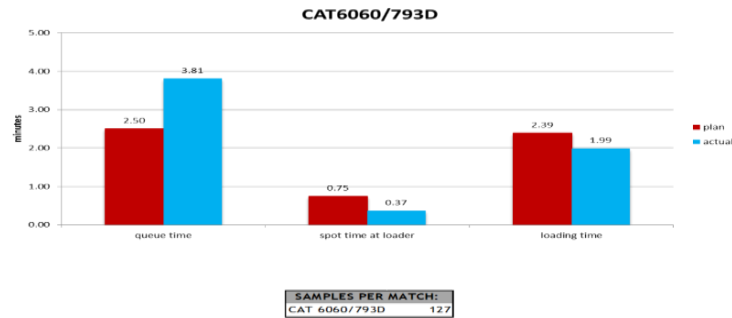
ref_pala	N°_pala	ref_camión	N°_camión	Esp. pala	Ac. pala	cargue	ciclo_cargue	viaje_ful	Esp. Botadero	Ac. botadero	botado	viaje_vacio	total_Ciclo	# pases pala	Hora salida	Hora llegada	match
EX3600	EH350	EH3500	403	8.12	0.49	2.25	10.86	6.48	0.00	0.16	0.45	4.40	22.35	5	9:18	9:45	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	403	9.19	0.54	2.19	11.92	7.47	0.00	0.19	0.36	5.47	25.41	5	9:45	10:12	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	403	7.22	0.50	2.12	9.84	7.24	0.00	0.17	0.38	5.20	22.83	5	10:12	10:36	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	403	9.19	2.29	2.00	13.48	6.48	0.00	0.11	0.43	4.11	24.61	4	10:36	11:02	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	789C	314	8.40	0.40	2.14	10.94	7.24	0.00	0.16	0.44	4.55	23.33	5	13:17	13:42	EX3600/789C
EX3600	EH350	789C	314	5.46	1.52	1.51	8.49	7.34	0.00	0.12	0.45	4.38	20.78	4	13:42	14:04	EX3600/789C
EX3600	EH350	789C	314	8.46	0.37	3.37	12.20	8.39	0.00	0.13	0.32	4.02	25.06	6	14:04	14:31	EX3600/789C
EX3600	EH350	789C	314	7.17	0.29	2.33	9.79	8.58	0.00	0.13	0.29	4.16	22.95	5	14:31	14:54	EX3600/789C
EX3600	EH350	789C	314	9.34	0.26	2.21	11.81	8.41	0.00	0.13	0.33	4.37	25.05	5	14:54	15:19	EX3600/789C
EX3600	EH350	789C	314	6.42	0.29	2.39	9.10	7.21	0.00	0.13	0.36	3.44	20.24	5	15:19	15:44	EX3600/789C
EX3600	EH350	789C	314	8.05	0.28	2.10	10.43	7.34	0.00	0.15	0.35	4.08	22.35	5	15:44	16:08	EX3600/789C
EX3600	EH350	789C	314	9.32	0.33	2.17	11.82	9.54	0.00	0.13	0.36	4.03	25.88	5	16:08	16:33	EX3600/789C
EX3600	EH350	789C	314	11.14	0.26	2.16	13.56	9.23	0.00	0.14	0.35	3.42	26.70	5	16:33	17:00	EX3600/789C
EX3600	EH350	EH3500	401	4.28	0.51	2.10	6.89	9.50	0.00	0.13	0.23	6.21	22.96	4	8:30	8:53	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	401	1.33	0.29	2.34	4.96	8.14	0.00	0.12	0.27	6.37	19.86	4	8:53	9:15	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	401	0.15	0.35	2.18	2.68	9.28	0.00	0.16	0.26	5.37	17.75	5	9:15	9:33	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	401	1.08	0.26	2.20	3.54	7.49	0.00	0.20	0.30	5.09	16.62	5	9:33	9:52	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	401	2.49	0.55	2.49	5.53	8.30	0.00	0.20	0.33	4.05	18.41	5	9:52	10:12	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	401	4.05	0.34	2.19	6.58	8.01	0.00	0.16	0.38	6.24	21.37	4	10:12	10:35	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	401	4.36	0.48	2.14	6.98	7.57	0.00	0.14	0.31	6.03	21.03	5	10:35	10:58	EX3600/EH3500
RH120-E	EH357	EH3500	401	0.00	0.14	4.34	4.48	8.50	0.00	0.14	0.44	6.41	19.97	6	10:58	11:20	RH120-E/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	401	2.55	0.41	2.23	5.19	8.13	0.00	0.06	0.18	7.09	20.65	5	12:09	12:45	EX3600/EH3500
RH120-E	EH357	EH3500	401	3.03	0.30	5.10	8.43	8.22	0.00	0.13	0.41	6.16	23.35	7	12:45	13:09	RH120-E/EH3500
RH120-E	EH357	EH3500	401	4.10	0.34	4.16	8.60	6.57	0.00	0.24	0.37	6.27	22.05	7	13:09	13:32	RH120-E/EH3500
RH120-E	EH357	EH3500	401	0.50	0.12	6.38	7.00	6.59	0.00	0.33	0.50	5.58	20.00	7	13:32	13:52	RH120-E/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	392	18.00	0.35	2.18	20.53	6.58	0.00	0.29	0.43	5.13	32.96	4	15:10	15:44	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	392	21.42	0.36	2.50	24.28	7.28	0.00	0.11	0.51	5.03	37.21	5	15:44	16:23	EX3600/EH3500
EX3600	EH350	EH3500	392	14.48	0.27	3.20	17.95	6.57	0.00	0.16	0.56	5.35	30.59	5	16:23	16:56	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	0.00	0.18	2.29	2.47	11.53	0.00	0.17	0.29	9.17	23.63	5	9:01	9:24	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	0.00	0.17	2.38	2.55	10.40	0.00	0.24	0.24	8.07	21.50	5	9:24	9:48	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	4.29	0.45	2.13	6.87	12.17	0.00	0.21	0.41	8.44	28.10	5	9:48	10:17	EX3600/EH3500
EX3600	EH406	EH3500	399	1.08	0.24	3.03	4.25	12.13	0.00	0.15	0.39	8.37	25.59	6	10:17	10:51	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	0.00	0.38	2.27	2.75	11.42	0.00	0.27	0.59	9.10	24.13	6	10:51	11:14	EX3600/EH3500
EX3600	EH406	EH3500	399	0.22	0.27	2.39	2.88	11.44	0.00	0.12	0.30	9.05	23.79	6	11:14	11:39	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	0.00	0.26	2.29	2.55	11.21	0.00	0.22	0.37	9.19	23.54	6	11:39	12:00	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	0.00	0.35	2.21	2.56	11.58	0.00	0.26	0.45	8.51	23.36	5	12:00	12:25	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	3.09	0.31	2.33	6.73	10.28	0.35	0.25	0.43	10.07	27.11	5	15:10	15:40	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	4.43	0.36	2.56	7.35	13.35	0.00	0.24	0.57	8.48	29.99	6	15:40	16:13	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	399	0.34	0.29	2.08	2.71	11.37	0.00	0.51	0.47	9.30	24.36	5	16:13	16:39	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	388	0.58	0.38	1.53	2.49	14.22	0.00	0.26	0.59	11.15	28.71	5	8:39	9:08	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	388	1.27	0.49	2.32	4.08	13.23	0.00	0.40	0.58	10.22	28.51	5	9:08	9:38	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	388	0.00	1.14	2.12	3.26	14.09	0.00	0.24	0.50	8.54	26.63	5	9:38	10:06	EX3600/EH3500
EX3600	EH409	EH3500	388	0.17	0.34	2.07	2.58	15.17	0.00	1.18	0.59	10.50	30.02	5	10:06	10:37	EX3600/EH3500

Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Promedio Tiempos de Carga Actuales.

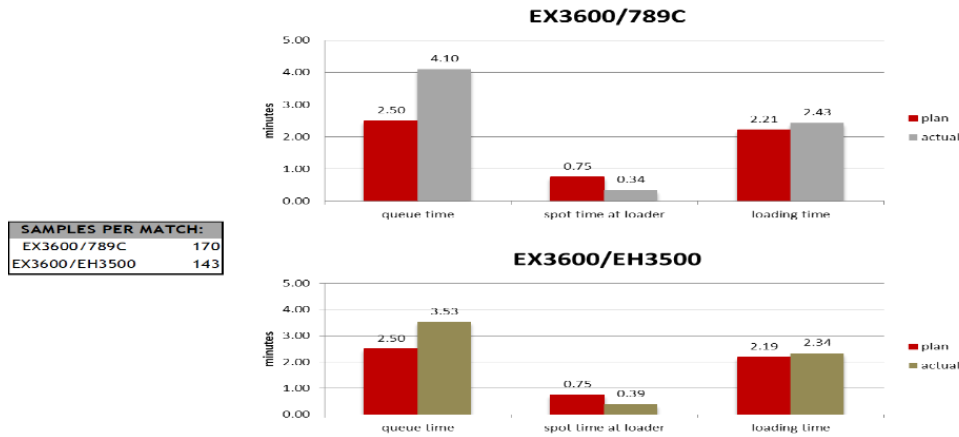
Luego de organizada la información, se procedió a promediar los tiempos de espera, aculatamiento y cargue de las muestras filtradas, con el fin de dar a conocer los rendimientos de los diferentes tipos de Matches planeados por la empresa en la que se realizó la investigación para así dar evidencia de la efectividad de los mismos. Estos promedios de ciclos de cargue se pueden apreciar en las figuras Figura 4-18, Figura 4-19, Figura 4-20 y Figura 4-21.

Figura 4-18 Promedio ciclos de cargue CAT 6060 FS/793D.



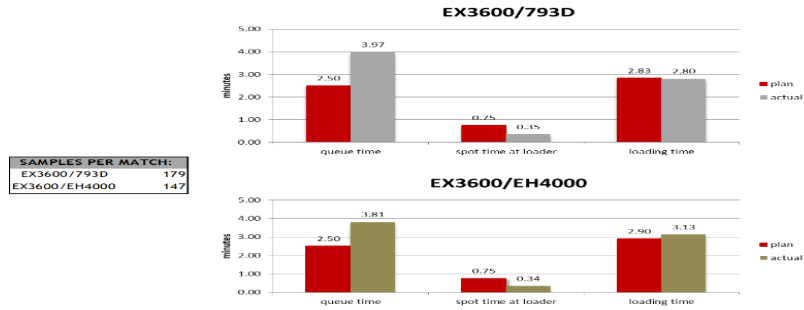
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-19 Promedio ciclos de cargue HITACHI EX3600/789C_EH3500.



Fuente: Elaboración propia

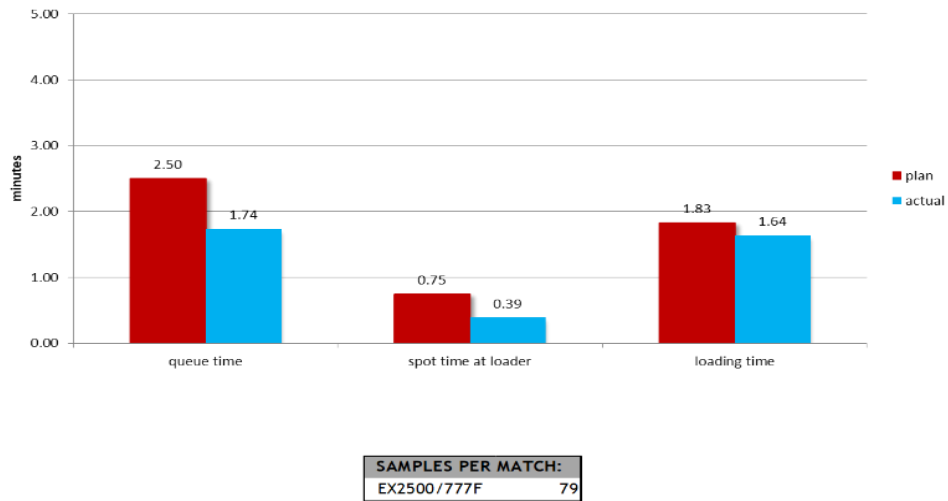
Figura 4-20 Promedio ciclos de cargue HITACHI EX3600/793D_EH4000.



SAMPLES PER MATCH:	
EX3600/793D	179
EX3600/EH4000	147

Fuente: Elaboración propia

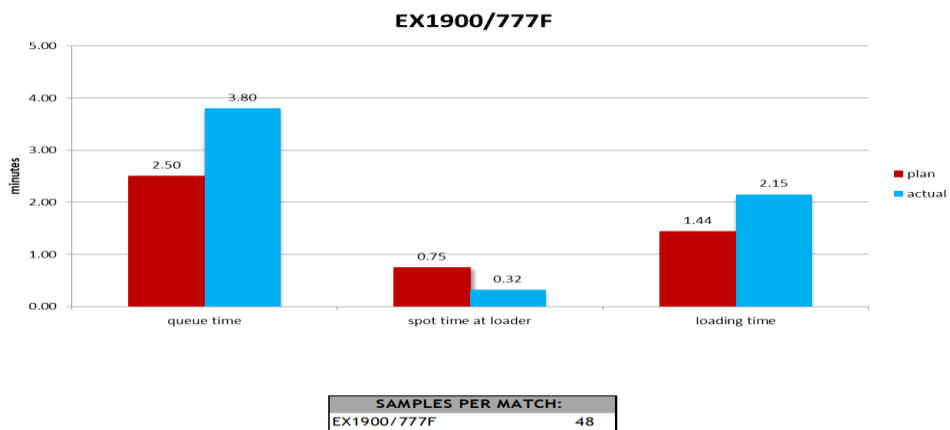
Figura 4-21 Promedio ciclos de carga HITACHI EX2500/777F.



SAMPLES PER MATCH:	
EX2500/777F	79

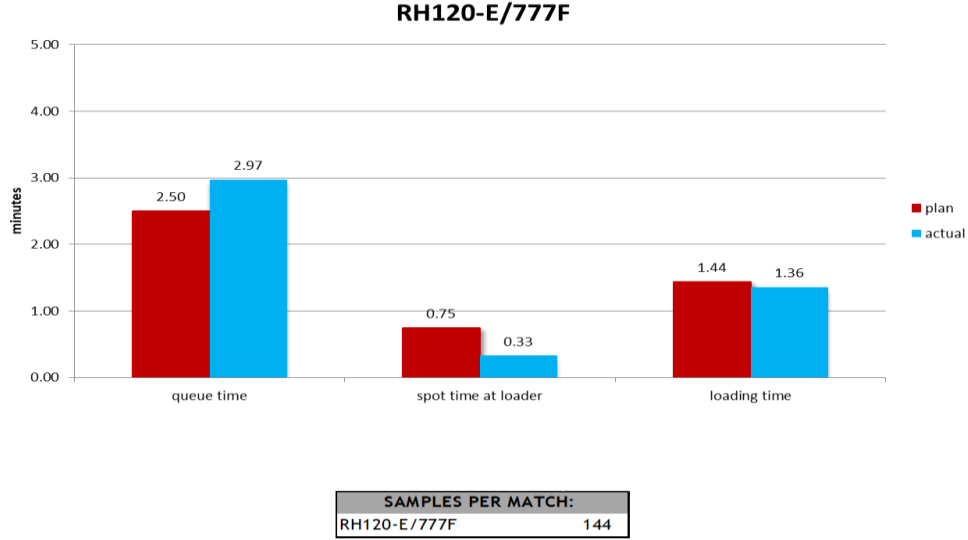
Fuente: Elaboración propia

Figura 4-22 Promedio ciclos de carga HITACHI EX1900-6/777F



SAMPLES PER MATCH:	
EX1900/777F	48

Fuente: Elaboración propia

Figura 4-23 Promedio ciclos de cargue TEREX RH120-E/777F.

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Promedio de Pases por Match

Para la construcción de un match, las capacidades máximas y efectivas del balde del cargador y del camión minero son de vital importancia, ya que estos factores nos delimitaran el número pasadas que se necesita realizar para que el camión realice un viaje con su capacidad máxima disponible y así sea rentable la operación.

Al momento de conformar la flota para la operación de una faena el match pala-camión es un concepto que se analiza en profundidad: “Al seleccionar un camión, al mismo tiempo se está diseñando la mina, el ancho del camino, etc. y eso también tiene relación con la elección del equipo de carguío, la capacidad de balde, buscando obtener menos pases entre una pala y un camión para transformar el proceso en algo eficiente⁴.

En la Tabla 3-8 podemos observar los diferentes tipos de marches divididos por el número de pases realizados en cada cargue muestreado, en los cuales se observan

⁴ Grandes Camiones y Palas: Un match que apunta a un mayor rendimiento. Revista Minería Chilena. <http://www.mch.cl/informes-tecnicos/grandes-camiones-y-palas-un-match-que-apunta-a-mayor-rendimiento/>

los promedios de tiempo entre pases y el tiempo promedio de cague realizado en cada uno de estos.

Tabla 3-8 Promedio de pases por match.

N° pases								
Match	Samples	3 pases	4 pases	5 pases	6 pases	7 pases	8 pases	Pases AVG.
CAT 6060/793D	127	1	114	11	1	-	-	4.03
EX1900-6/777F	48	-	47	1	-	-	-	3.78
EX2500/777F	79	42	36	1	-	-	-	5.09
EX3600/789C	170	-	12	147	10	-	1	5.35
EX3600/793D	179	-	1	3	125	49	1	6.51
EX3600/EH3500	143	-	6	102	25	7	3	5.70
EX3600/EH4000	147	-	-	1	54	75	17	6.53
RH120-E/777F	144	102	38	4	-	-	-	3.86

pass to pass time								
Match	Samples	3 pases	4 pases	5 pases	6 pases	7 pases	8 pases	Pass to Pass AVG.
CAT 6060/793D	127	0.48	0.37	0.48	0.44	-	-	0.44
EX1900-6/777F	48	-	0.45	0.51	-	-	-	0.48
EX2500/777F	79	0.36	0.41	0.44	-	-	-	0.40
EX3600/789C	170	-	0.51	0.47	0.38	-	0.38	0.44
EX3600/793D	179	-	-	0.45	0.44	0.43	0.41	0.43
EX3600/EH3500	143	-	0.54	0.46	0.41	0.34	0.37	0.42
EX3600/EH4000	147	-	-	0.50	0.49	0.45	0.49	0.48
RH120-E/777F	144	0.39	0.35	0.30	-	-	-	0.35

total loading time											
Match	Samples	3 pases	4 pases	5 pases	6 pases	7 pases	8 pases	Loading Time AVG.	plan	Dif.	
CAT 6060/793D	127	1.44	1.48	2.40	2.64	-	-	1.99	2.39	0.40	
EX1900-6/777F	48	-	1.80	2.55	-	-	-	2.18	1.44	-0.74	
EX2500/777F	79	1.08	1.64	2.20	-	-	-	1.64	1.83	0.19	
EX3600/789C	170	-	2.04	2.35	2.28	-	3.04	2.43	2.21	-0.22	
EX3600/793D	179	-	-	2.25	2.64	3.01	3.28	2.80	2.83	0.04	
EX3600/EH3500	143	-	2.16	2.30	2.46	2.38	2.96	2.45	2.19	-0.26	
EX3600/EH4000	147	-	-	2.50	2.94	3.15	3.92	3.13	2.90	-0.23	
RH120-E/777F	144	1.17	1.40	1.50	-	-	-	1.36	1.44	0.08	

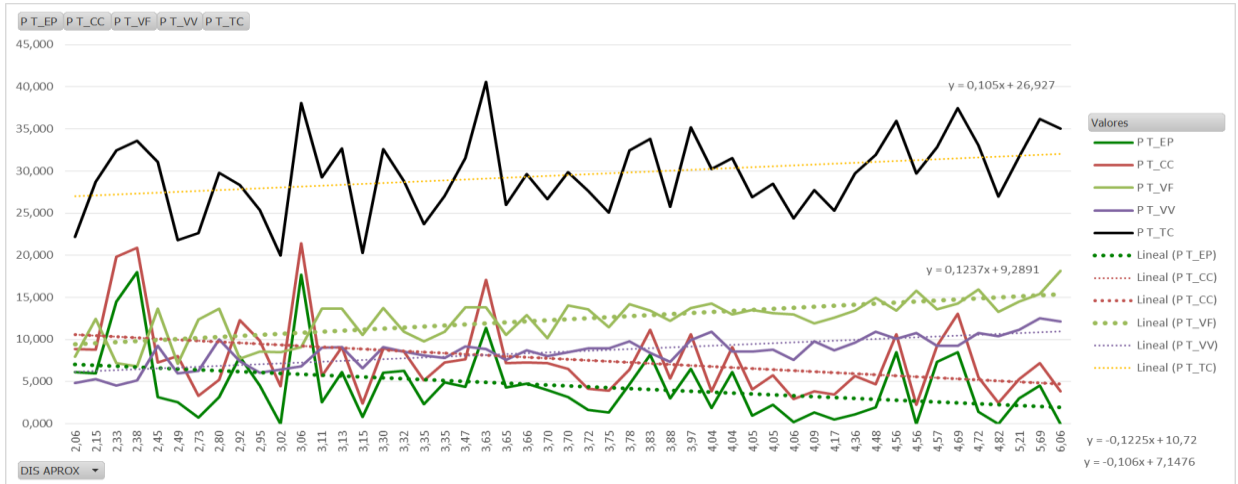
Fuente: Elaboración propia

4.3 Aplicación del modelo

Para validar que el comportamiento de nuestro sistema si se comporta como lo expresamos en la ecuación (4), de los datos obtenidos con los datos reales en campo analizamos las tendencias que observamos en la

Figura 3-24

Figura 3-24 Tendencia de análisis de datos

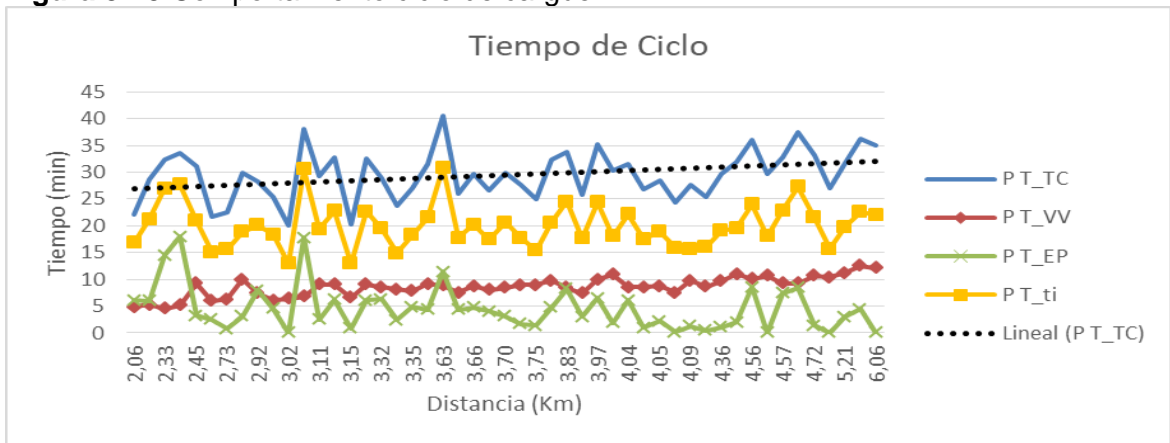


Fuente: Elaboración propia.

Encontramos una variabilidad pero dicho comportamiento está dada por factores externos factores como:

a. Tiempo de ciclo de carga (PT-CC) = PT_EP + Factor constante que genera una variabilidad. (entre más largo el trayecto el tiempo de carga disminuye) a razón de que el T-EP disminuye. a razón que se disminuye colas en el sistema. Por esta razón es un factor a analizar para la asignación de camiones la distancia como se observa en la curva color azul de la Figura 3-25.

Figura 3-25 Comportamiento ciclo de cargue



Fuente: Elaboración propia.

b. La línea de tendencia de la curva PT-EP (Tiempo de espera en pala) color verde oscuro tiene un comportamiento lineal tiene una pendiente negativa quiere decir que decrece. Como se observa en la curva de color verde de la gráfica

c. Figura 3-24 Dada por la Ecuación 8:

$$T-EP = -0,106x + 7,1476 \quad (8)$$

Esto nos demuestra que si tiempo de espera en pala aumenta entonces el tiempo de ciclo de carga aumenta por tal motivo entre ambos tenemos va haber relación que podemos aproximamos a Ecuación 9:

$$Tcc = te + k \quad (9)$$

Donde

te: tiempo de espera

k: valores constantes (t aculatamiento y t carga)

La tendencia de TP-CC Tiempo de cargue (*tcc*) y observamos que también presenta una pendiente negativa muy relacionada al factor de tiempo a partir de los datos reales dada por la Ecuación 10

$$TP-CC = -0,1225x + 10,72 \quad (10)$$

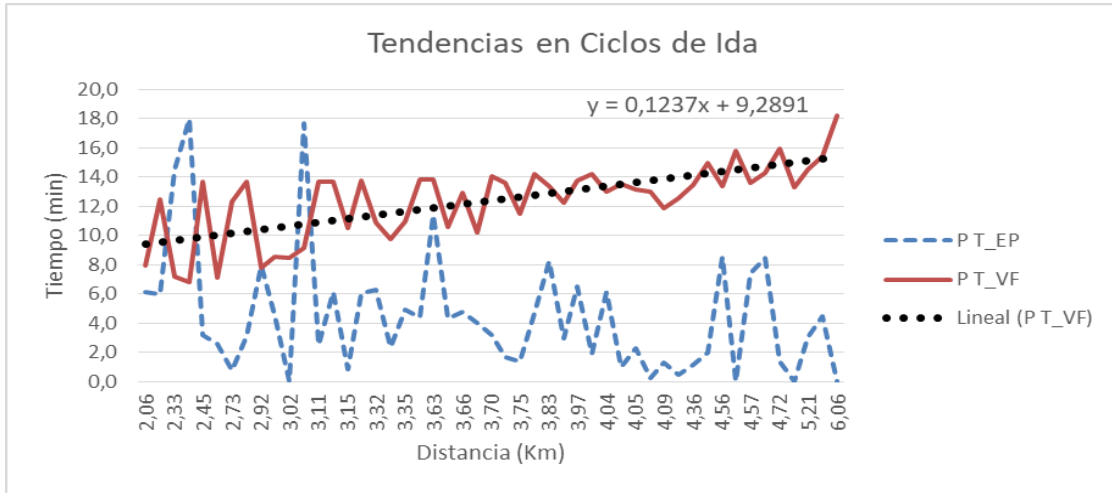
Teniendo en cuenta el comportamiento de la tendencia donde nos muestra que es un comportamiento aproximado donde la variación en el valor no es representativo, se determina estos valores como constantes pese a que el experimento expresaba una variabilidad realizamos ajustes llegando a que, el valor promedio es 0,38.

d. Para el tiempo de viaje full TP_VF la tendencia de los datos me está entregando una pendiente positiva dada por la Ecuación 11:

$$TP_{VF} = 0,1237x + 9,2891 \quad (11)$$

La ecuación de tendencia nos demuestra que, a mayor distancia, el tiempo de viaje de ida aumenta como se observa Figura 3-26. En esta se nota la tendencia lineal del tiempo de viaje full y como al aumentar la distancia aumenta el tiempo y que existe factores.

Figura 3-26 Comportamiento ciclo de viaje FullTP-VF



Fuente: Elaboración propia

e. Ya analizado nuestros datos obtenemos que las variables estocásticas analizar son tx y ty . Donde tx es tiempo variable de ida y ty tiempo variable de regreso

Esto lo podemos confrontar por medio de la tendencia que maneja el sistema (línea color negro de la gráfica

Figura 3-24) vemos a mayor distancia mayor es su tiempo dada por la Ecuación 12

$$TP-TC = 0,105x + 26,927 \quad (12)$$

Es por esto que nuestra función objetivo será la ecuación (5) anteriormente planteada.

De aquí planeamos el modelo a optimizar

$$\min: T_{tc} = \sum c_i x_i \quad (13)$$

Al encontrar el tiempo de ciclo óptimo podemos Maximizar la productividad de nuestro sistema dada por la Ecuación 14.

$$P_{i-j} = \sum \left[\left(\frac{C_{pc}}{T_{tc}} \right) * disc \right] \quad (14)$$

Dónde:

P_{i-j} : productividad del camión k en circuito $[i, j]$ [t/h].

C_{pc} : Carga promedio del camión k [t]

T_{tc} : Tiempor total del ciclo optimizado para dada camión

$disc$ = disponibilidad de cada camión

4.4 Input de la Investigación

La mayoría de los inputs utilizados en esta investigación se obtienen desde los datos obtenidos en campo y de las estimaciones realizadas, donde están las distribuciones de los tiempos. Como tiempos de acuatamiento, tiempos de carga y descarga que se tomaron dentro del proyecto y tiempos de esperas que son los valores para reducir en el sistema.

Los parámetros utilizados para la flota de camiones y para los equipos de carguío se pueden observar en la Tabla 4-9 y Tabla 4-10. Para la determinación de los parámetros se tomó como base los procedimientos establecidos por la empresa en la que se aplicó el caso de estudio como el caso de velocidades utilizadas y para los tiempos de acuatamiento se tuvo en cuenta del comportamiento de los datos tomados en campo y la tendencia de estas, con relación a la disponibilidad se tuvo en cuenta el promedio utilizados en la planificación a corto plazo.

Tabla 4-9 Inputs generales de flota de camiones

Parámetros	Valor
Velocidad cargado [km/h]	$10 < v_{ii} < 25$
Velocidad descargado [km/h]	$25 < v_{vi} < 40$
Tiempo acuatamiento en frente de carga [min]	0,03
Tiempo acuatamiento en frente de descarga [min]	0,35
Disponibilidad promedio [%]	83.9 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-10 Inputs generales de flota de palas

Parámetros	Valor
Carga promedio [t]	3,1
Tiempo de carga [min]	2,5
Disponibilidad [%]	87%

Fuente: elaboración propia

Tabla 4-11 capacidad de camiones a utilizar

TRUCK	FC	Unidad
793D	90	BCM
789C	72	BCM
777F	36	BCM
EH3500	70	BCM
EH4000	90	BCM
777FCoal	36	BCM
777F	36	BCM
PROMEDIO	61,4	

Fuente: Elaboración propia

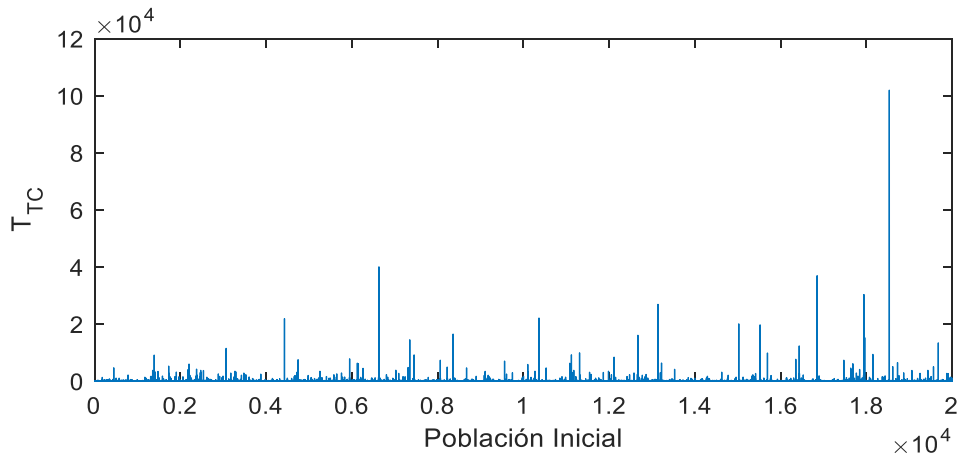
Las velocidades utilizadas en el modelo de optimización corresponden a una velocidad del equipo cargado y descargado. En este caso, el proyecto de validación contempla velocidades del equipo estando cargado y descargado, por lo que la velocidad utilizada corresponde al promedio de las velocidades del camión cargado y camión vacío que se obtienen en la simulación las cuales se pueden observar en la Tabla 4-9,

Finalmente, se debe mencionar que la posición inicial de los camiones en la simulación es aleatoria entre los diferentes destinos antes mencionados.

4.5 Resultados y análisis

Se toma una población inicial de 20.000 cromosomas para llevar al algoritmo evolutivo, generaciones que son aplicadas al modelo de la función objetivo cuyos resultados de T_{TC} se muestran en la Figura 4-37 .Ver Anexo 2

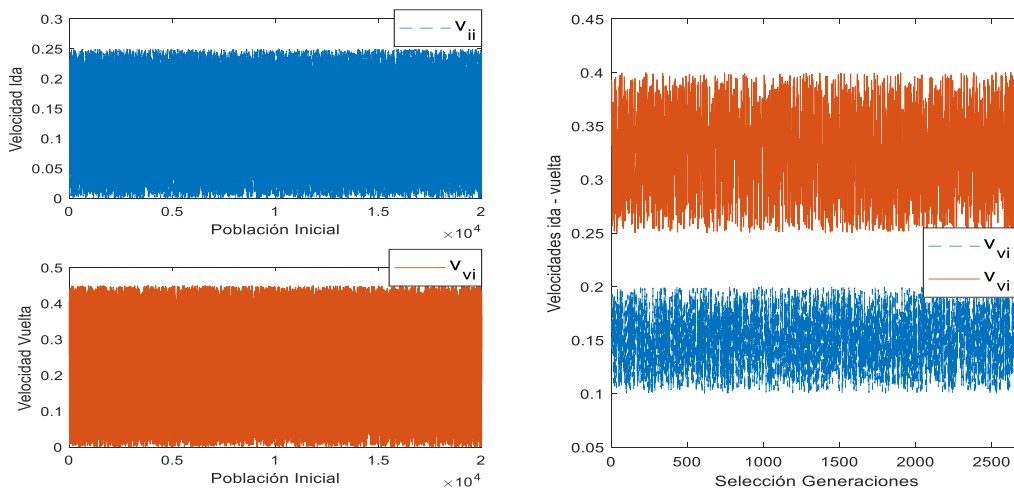
Figura 4-27 Población Inicial



Fuente: Elaboración propia

De la población inicial se seleccionan las generaciones que cumplen con las restricciones de velocidades de ida $10 < v_{ii} < 20$ (Km/h) y velocidades de vuelta $25 < v_{vi} < 40$ (Km/h), reduciendo significativamente las generaciones que cumplen con ambos criterios como se muestra en la Figura 4-38

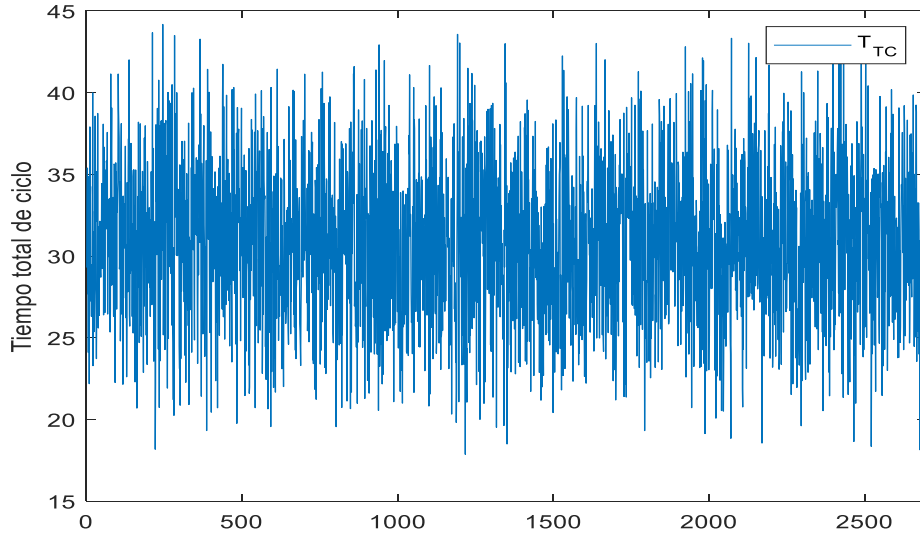
Figura 4-28 Selección de población.



Fuente: Elaboración propia.

Luego se seleccionan las generaciones que cumplen rangos de tiempo ideal permitidos para los tiempo totales de ciclo como se observa en la Figura 4-39 y a una distancia de 2,5 km.

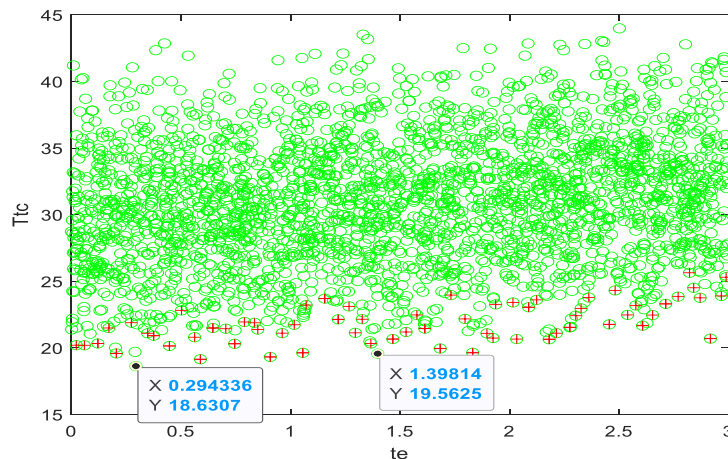
Figura 4-29 Generación que cumple con rangos T_i



Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la optimización considerando un máximo tiempo de espera de 3 minutos el resultado gráfico del algoritmo resalta los tiempos de espera permitidos para que el proceso siga siendo óptimo, como se muestra en la Figura 4-41. En este caso de estudio no se realizó ninguna restricción para la selección de posibles ganadores obteniendo los datos marcados con una cruz roja (+) en la figura.

Figura 4-30 Tiempos de espera permitidos



Fuente: Elaboración propia.

Obteniendo que de los 20.000 cromosomas iniciales solo 90 corresponden a los tiempos de espera permitidos para llegar a el ciclo óptimo en la operación como se observa en la Tabla 4-12. Ver Anexo 3

Tabla 4-12 Tiempo de espera óptimos

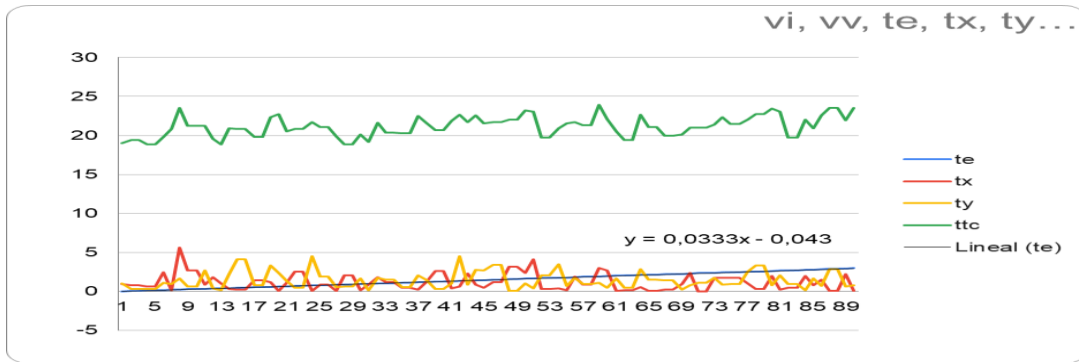
Ítem	Velocidad ida (vi)	Velocidad vuelta (vv)	de Tiempo de espera (Te)
1	0,16	0,40	0,00
2	0,15	0,37	0,05
3	0,15	0,37	0,05
4	0,16	0,37	0,14
5	0,16	0,37	0,14
6	0,19	0,37	0,17
7	0,13	0,39	0,20
8	0,20	0,35	0,26
9	0,16	0,34	0,29
10	0,16	0,34	0,29
12	0,19	0,29	0,39
13	0,18	0,32	0,40
14	0,16	0,34	0,42
15	0,19	0,36	0,48
17	0,19	0,30	0,55
18	0,19	0,30	0,55
20	0,15	0,26	0,60
21	0,18	0,31	0,66
22	0,17	0,34	0,71
23	0,17	0,34	0,71
24	0,19	0,34	0,76
25	0,19	0,26	0,80
26	0,19	0,26	0,80
27	0,16	0,30	0,85
28	0,20	0,39	0,89
29	0,20	0,39	0,89
30	0,18	0,29	0,95
31	0,18	0,32	0,97
32	0,18	0,31	1,00
33	0,18	0,33	1,04
34	0,18	0,33	1,04
35	0,18	0,26	1,14
36	0,18	0,26	1,14
37	0,14	0,35	1,19
38	0,16	0,33	1,22
39	0,20	0,31	1,25
40	0,20	0,31	1,25
41	0,15	0,31	1,28
42	0,20	0,32	1,32
43	0,19	0,28	1,38
44	0,16	0,35	1,39
45	0,17	0,36	1,45
46	0,19	0,38	1,48
47	0,19	0,38	1,48
48	0,17	0,35	1,56
49	0,17	0,35	1,56
50	0,16	0,32	1,63

Ítem	Velocidad ida (vi)	Velocidad de vuelta (vv)	Tiempo de espera (Te)
52	0,19	0,39	1,70
53	0,19	0,39	1,70
54	0,20	0,40	1,73
55	0,16	0,28	1,77
56	0,20	0,32	1,80
57	0,16	0,35	1,88
58	0,16	0,35	1,88
59	0,18	0,27	1,91
61	0,18	0,35	2,02
62	0,19	0,31	2,04
63	0,19	0,31	2,04
64	0,17	0,37	2,11
65	0,19	0,28	2,15
67	0,19	0,37	2,20
68	0,19	0,37	2,20
69	0,18	0,33	2,25
71	0,16	0,34	2,35
72	0,16	0,34	2,35
73	0,19	0,40	2,38
74	0,17	0,35	2,44
75	0,19	0,34	2,45
76	0,19	0,34	2,45
77	0,19	0,38	2,50
78	0,17	0,39	2,57
79	0,17	0,39	2,57
80	0,15	0,39	2,61
81	0,15	0,39	2,68
82	0,19	0,39	2,73
83	0,19	0,39	2,73
84	0,16	0,38	2,74
85	0,19	0,38	2,81
86	0,16	0,37	2,83
87	0,16	0,36	2,92
88	0,16	0,36	2,92
89	0,19	0,33	2,95
90	0,13	0,39	2,99

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que se tiene un máximo de tiempo de espera (te) de 2,99 minutos si observamos la grafica de tendecia que muestra una ecuación: $y = 0,0333x - 0,043$ nos muestra un comportamiento lineal como se observa en la Figura 4-42.

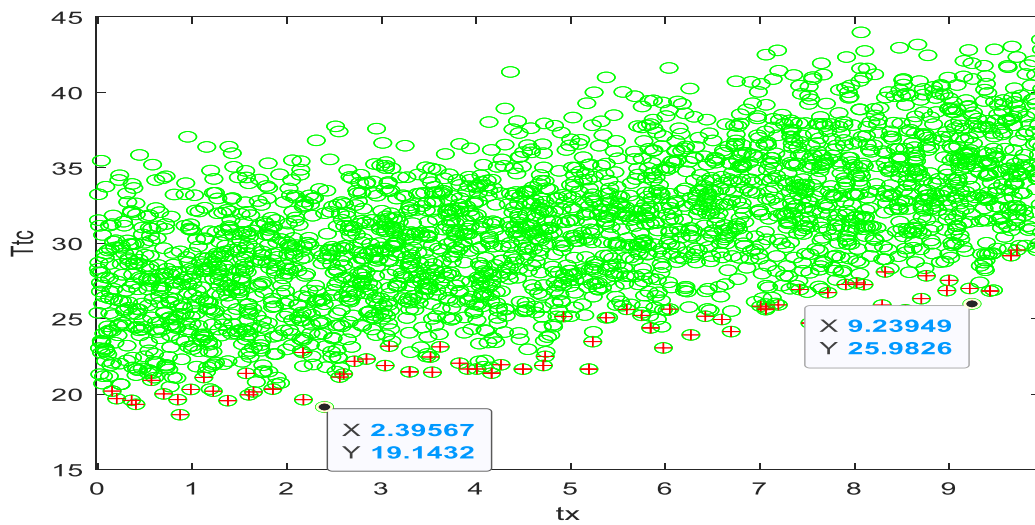
Figura 4-31 Tendencia Tiempo de espera vs Tiempo de ciclo Total



Fuente: Elaboración propia.

Se repite el procedimiento buscando ahora valores óptimos para el tiempo de incertidumbre en el tiempo de viaje de ida que se cataloga (tx) encontramos que el tiempo máximo tx permitido es de 9,93 minutos como se observa en la **Figura 4-32**.

Figura 4-32 Tiempo tx óptimos



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-13 los valores de los 90 cromosomas con menos tiempos espera (te) vs Tiempo variable tx con una tiempos variadables de ida que oscilan entre 1minuto y 9,3 minutos como se observan en los datos de la tabla.

Tabla 4-13 Iteración tiempo espera vS Tx

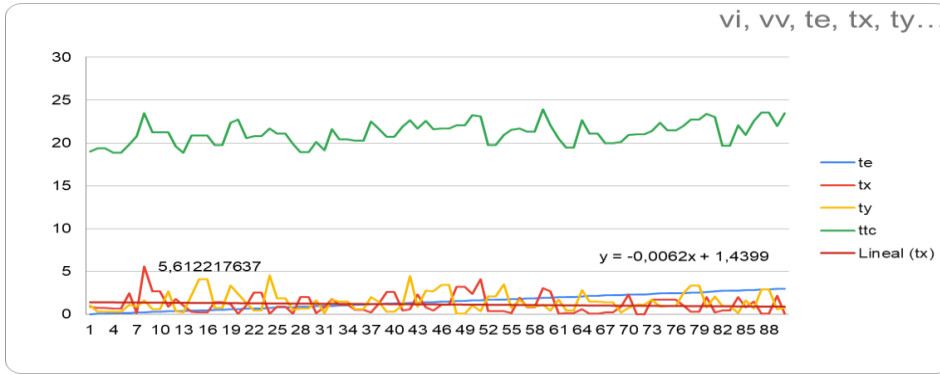
Ítem	Velocidad ida (vi)	Velocidad vuelta (vv)	de Tiempo de espera (Te)	Tiempo variable de ida (Tx)
1	0,16	0,30	0,85	0,08
2	0,19	0,31	2,04	0,17
3	0,19	0,31	2,04	0,17
4	0,19	0,39	2,73	0,45
5	0,16	0,37	0,14	0,64
6	0,16	0,37	0,14	0,64
7	0,18	0,32	0,97	0,85
8	0,16	0,40	0,00	0,94
9	0,18	0,32	0,40	1,01
10	0,18	0,32	0,40	1,01
12	0,19	0,30	0,55	1,40
13	0,19	0,30	0,55	1,40
14	0,14	0,32	0,83	1,47
16	0,19	0,29	0,39	1,80
17	0,19	0,29	0,39	1,80
18	0,20	0,39	0,89	2,02
19	0,19	0,29	0,16	2,24
20	0,19	0,29	0,16	2,24
21	0,18	0,31	0,02	2,36
22	0,19	0,37	0,17	2,44
23	0,17	0,37	0,85	2,52
25	0,19	0,34	2,30	2,87
26	0,19	0,34	2,30	2,87
27	0,19	0,37	0,15	3,07
28	0,19	0,37	0,15	3,07
29	0,17	0,35	1,56	3,20
30	0,16	0,39	0,50	3,37
31	0,16	0,39	0,07	3,45
32	0,17	0,31	0,90	3,54
33	0,20	0,38	1,78	3,65
34	0,18	0,37	2,06	3,80
35	0,18	0,37	2,06	3,80
36	0,19	0,35	0,40	3,99
37	0,18	0,32	1,68	4,12
38	0,19	0,34	0,79	4,34
39	0,19	0,34	0,79	4,34
40	0,19	0,34	0,97	4,39
41	0,18	0,32	2,64	4,54
42	0,19	0,35	0,30	4,69
43	0,18	0,40	1,99	4,91
44	0,18	0,40	1,99	4,91

45	0,20	0,32	0,61	5,10
46	0,20	0,32	0,61	5,10
47	0,19	0,26	1,73	5,18
48	0,16	0,39	1,58	5,43
49	0,16	0,39	1,58	5,43
50	0,20	0,35	0,26	5,61
51	0,20	0,35	0,26	5,61
52	0,15	0,37	0,78	5,74
53	0,14	0,36	0,11	5,88
54	0,18	0,38	0,53	6,10
55	0,18	0,38	0,53	6,10
56	0,19	0,37	0,67	6,32
57	0,19	0,37	0,67	6,32
58	0,17	0,36	1,54	6,59
59	0,18	0,39	1,29	6,73
60	0,18	0,39	1,29	6,73
62	0,18	0,35	0,12	6,91
63	0,18	0,33	0,43	7,03
64	0,18	0,35	1,62	7,26
66	0,19	0,32	0,43	7,44
67	0,19	0,32	0,43	7,44
68	0,19	0,38	1,49	7,55
69	0,19	0,31	1,39	7,73
70	0,18	0,33	0,93	7,90
71	0,18	0,33	0,93	7,90
72	0,16	0,37	0,10	8,00
73	0,20	0,37	1,89	8,08
76	0,20	0,34	1,72	8,38
77	0,20	0,39	1,19	8,59
78	0,18	0,38	2,29	8,68
79	0,18	0,39	1,24	8,77
80	0,18	0,39	1,24	8,77
81	0,16	0,27	0,92	9,05
82	0,15	0,37	0,54	9,11
83	0,19	0,28	1,59	9,25
84	0,19	0,32	0,46	9,37
85	0,19	0,32	0,46	9,37
86	0,19	0,35	1,71	9,62
87	0,14	0,36	0,05	9,73
88	0,14	0,36	0,05	9,73
89	0,17	0,38	0,72	9,93
90	0,17	0,38	0,72	9,93

Fuente: Elaboración propia

Se realiza la gráfica de tendencia de nuestros datos que nos arroja un comportamiento lineal como se observa en la Figura 4-43 dado por la ecuación $y = -0,0062x + 1,4399$

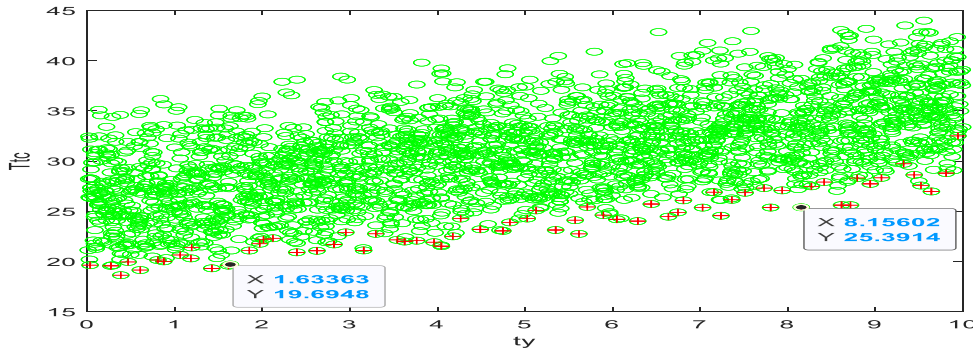
Figura 4-33 Tendencia Tx óptimos



Fuente: Elaboración propia

Para los 90 cromosomas que se encuentran dentro de los seleccionados encontramos que para los tiempos de incertidumbre de nuestro sistema llamados tx el máximo permitido oscila en los 9,3 minutos como se observa en la **Figura 4-34**.

Figura 4-34 Cromosomas ty Vs Ttc



Fuente: Elaboración propia

De la población el algoritmo propuesto selecciona los cromosomas que contienen los tiempos variables de ida (tx) y tiempos variables de vuelta (ty) máximos y mínimos permitidos para obtener el tiempo de ciclo de acarreo óptimo. Como se observa en la Tabla 4-14

Tabla 4-14 Tiempos variables de vuelta (Ty óptimos)

CROMOSOMAS	velocidad de Ida (vi)	Velocidad de vuelta (vv)	Tiempo de espera (te)	Tiempos Variables ida (tx)	Tiempos Variables de vuelta (ty)	Tiempo total de ciclo (TTC)
1	0,18	0,32	0,97	0,85	0,12	19,16
2	0,18	0,32	0,40	1,01	0,19	18,86
3	0,16	0,37	0,14	0,64	0,30	18,83
4	0,19	0,31	2,04	0,17	0,49	19,42

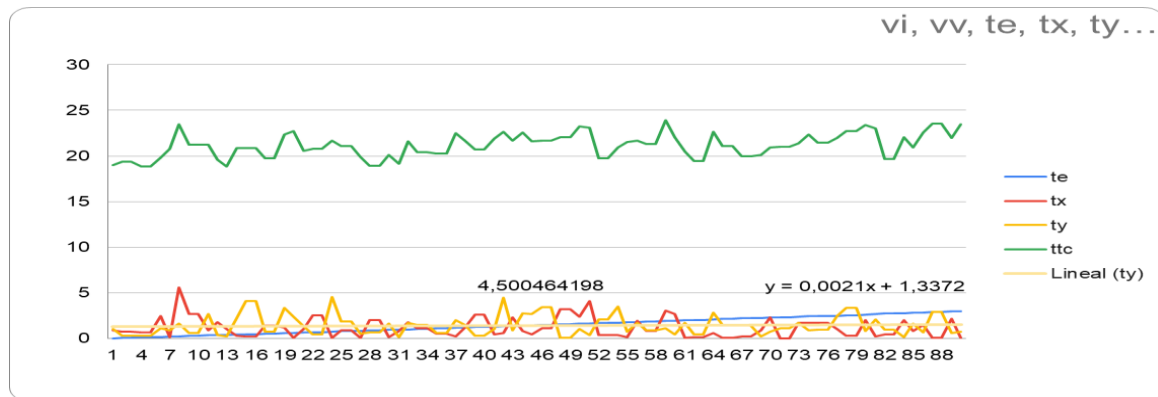
5	0,19	0,31	2,04	0,17	0,49	19,42
6	0,20	0,39	0,89	2,02	0,65	18,89
7	0,19	0,30	0,55	1,40	0,77	19,77
8	0,19	0,39	2,73	0,45	0,97	19,69
9	0,16	0,40	0,00	0,94	1,05	19,02
10	0,16	0,40	0,00	0,94	1,05	19,02
11	0,17	0,34	1,69	0,96	1,19	20,91
12	0,18	0,31	0,66	1,08	1,37	20,53
13	0,19	0,37	2,20	0,21	1,46	19,95
14	0,18	0,29	0,95	0,18	1,64	20,09
15	0,18	0,29	0,95	0,18	1,64	20,09
16	0,18	0,40	1,07	1,34	1,92	20,49
17	0,18	0,40	1,07	1,34	1,92	20,49
18	0,19	0,39	1,70	0,34	2,07	19,73
19	0,18	0,36	0,06	0,72	2,20	19,44
20	0,18	0,36	0,06	0,72	2,20	19,44
21	0,20	0,39	0,07	2,11	2,34	20,02
22	0,19	0,38	2,50	1,03	2,49	21,99
23	0,19	0,32	0,16	1,33	2,58	20,42
24	0,20	0,30	1,73	0,19	2,65	21,19
25	0,18	0,38	1,04	1,25	2,75	21,47
26	0,16	0,31	0,92	0,04	2,90	22,31
27	0,15	0,39	1,27	1,09	3,10	23,32
28	0,18	0,35	2,27	0,78	3,20	22,84
29	0,19	0,27	0,58	1,17	3,32	22,36
30	0,19	0,38	1,48	1,15	3,41	21,68
31	0,20	0,36	0,17	0,76	3,52	20,18
32	0,20	0,36	0,17	0,76	3,52	20,18
33	0,17	0,27	0,79	0,21	3,70	23,22
34	0,17	0,27	0,79	0,21	3,70	23,22
35	0,20	0,31	1,16	1,39	3,86	22,87
36	0,18	0,38	0,06	0,06	4,01	20,19
37	0,18	0,38	0,06	0,06	4,01	20,19
38	0,19	0,27	1,15	0,93	4,12	23,93
39	0,19	0,37	0,05	2,92	4,42	23,25
40	0,19	0,34	0,76	0,11	4,55	21,69
41	0,19	0,34	0,76	0,11	4,55	21,69
42	0,17	0,40	0,38	1,35	4,73	23,14
43	0,18	0,36	0,60	0,84	4,89	22,92
44	0,18	0,36	0,60	0,84	4,89	22,92
45	0,17	0,39	0,97	0,14	5,08	23,02
46	0,17	0,40	1,92	0,06	5,14	23,95
47	0,19	0,35	2,77	0,07	5,24	24,04
49	0,17	0,40	1,03	2,72	5,45	25,69
50	0,16	0,31	0,63	0,55	5,74	25,27
51	0,17	0,38	0,26	1,37	5,82	23,98
52	0,17	0,38	0,26	1,37	5,82	23,98
53	0,17	0,38	0,74	0,38	6,06	24,11
54	0,17	0,38	0,74	0,38	6,06	24,11
55	0,19	0,37	0,16	2,61	6,23	25,08
56	0,20	0,35	1,16	1,02	6,42	24,40
57	0,20	0,35	1,16	1,02	6,42	24,40
58	0,19	0,26	0,13	2,86	6,54	27,16
59	0,17	0,29	0,57	0,54	6,66	25,83
60	0,20	0,39	1,17	2,61	6,74	25,85
61	0,18	0,35	1,82	0,60	6,87	25,91

62	0,19	0,39	0,01	2,57	7,00	25,29
63	0,19	0,39	0,01	2,57	7,00	25,29
64	0,16	0,33	0,75	1,20	7,14	26,99
65	0,16	0,26	0,01	0,50	7,36	26,78
66	0,16	0,38	0,25	1,37	7,41	26,17
67	0,19	0,35	2,40	0,83	7,64	27,13
68	0,19	0,35	2,40	0,83	7,64	27,13
69	0,20	0,39	0,78	3,89	7,70	27,77
70	0,18	0,40	0,85	2,60	7,90	27,49
71	0,19	0,39	1,79	0,93	7,96	26,33
72	0,19	0,38	1,23	1,37	8,13	26,37
73	0,20	0,36	0,22	0,13	8,17	24,18
74	0,20	0,36	0,22	0,13	8,17	24,18
75	0,20	0,33	0,86	0,21	8,33	25,44
76	0,15	0,34	0,73	0,14	8,48	27,43
77	0,17	0,40	0,67	1,08	8,64	26,81
78	0,19	0,38	1,48	0,66	8,70	26,58
79	0,19	0,38	1,48	0,66	8,70	26,58
80	0,19	0,28	0,09	0,47	8,93	26,51
81	0,19	0,30	0,40	0,22	9,07	26,66
82	0,19	0,35	0,45	0,63	9,17	26,54
83	0,19	0,35	0,45	0,63	9,17	26,54
84	0,20	0,33	1,09	0,71	9,26	27,16
85	0,20	0,30	0,62	1,35	9,40	27,85
86	0,17	0,35	0,38	0,23	9,64	27,36
87	0,17	0,35	0,38	0,23	9,64	27,36
88	0,16	0,37	0,84	0,21	9,74	28,16
89	0,19	0,34	1,34	0,41	9,90	27,96
90	0,19	0,34	1,34	0,41	9,90	27,96
PROMEDIO	0,18	0,35	0,89	0,92	5,09	23,51

Fuente: Elaboración propia

La ecuación de la tendencia del tiempo de variación de vuelta (ty) según el comportamiento de los datos esta dada por $y = 0,0021x + 1,3372$ como se observa en el Figura 4-46.

Figura 4-35 Tendencias Ty



Fuente: Elaboración propia

De los 90 cromosomas óptimos que nos arroja nos muestra los ciclos óptimos que podemos tenerme en el sistema en promedio de tiempo de ciclo total de 30,53 minuto ver Tabla 4-20 mostrando reducción en el tiempo de ciclo de 1 minutos con relación a los tiempos tomados en campo. Este sistema nos arroja una gama de valore posibles en el que podríamos alcanzar nuestro ciclo optimo teniendo en cuentas una condiciones de Velocidades y distancia.

Tabla 4-15 Relación tiempo de ciclo total optimo

CROMOSOMAS	velocidad de Ida (vi)	Velocidad de vuelta (vv)	Tiempo de espera (te)	Tiempos Variables ida (tx)	Tiempos Variables de vuelta (ty)	Tiempo total del ciclo de acarreo (TTC)
1	0,11	0,26	0,13	9,14	4,78	37,84
2	0,16	0,37	0,14	0,64	0,30	18,83
3	0,12	0,36	0,18	6,21	4,47	31,15
4	0,10	0,36	0,18	0,75	5,92	29,50
5	0,13	0,33	0,23	7,41	9,50	37,18
6	0,15	0,34	0,24	9,50	9,90	38,25
7	0,10	0,35	0,30	1,37	4,07	28,70
8	0,17	0,30	0,35	7,02	7,42	32,50
9	0,13	0,26	0,35	0,21	9,55	31,00
10	0,15	0,34	0,37	9,33	5,93	33,92
11	0,15	0,37	0,38	5,49	7,92	32,19
12	0,15	0,28	0,42	2,90	0,94	23,88
13	0,11	0,37	0,45	9,51	8,02	39,30
14	0,19	0,28	0,50	5,35	4,54	27,56
15	0,19	0,27	0,52	1,99	1,83	22,06
16	0,16	0,38	0,63	0,62	5,99	24,69
17	0,19	0,37	0,65	6,93	1,76	25,26
18	0,11	0,32	0,66	2,66	4,28	30,33
19	0,20	0,38	0,69	9,68	7,39	33,22
20	0,18	0,40	0,70	9,10	2,31	28,45
21	0,19	0,26	0,73	4,56	9,74	32,96
22	0,14	0,27	0,74	7,65	3,00	31,60
23	0,16	0,26	0,75	2,95	3,32	26,15
24	0,19	0,38	0,76	2,06	7,08	25,55
25	0,17	0,27	0,79	0,21	3,70	23,22
26	0,18	0,29	0,80	3,71	4,28	26,51
27	0,16	0,31	0,82	7,02	6,92	32,79
28	0,19	0,31	0,82	4,58	8,39	30,72
29	0,20	0,27	0,87	8,54	2,56	29,23
30	0,15	0,29	0,94	8,62	6,36	35,09
31	0,11	0,35	0,99	3,90	8,82	35,52
32	0,16	0,29	0,99	8,81	5,29	33,77
33	0,18	0,30	1,00	2,97	9,21	30,62
34	0,18	0,38	1,04	1,25	2,75	21,47
35	0,20	0,36	1,05	8,85	6,62	32,32

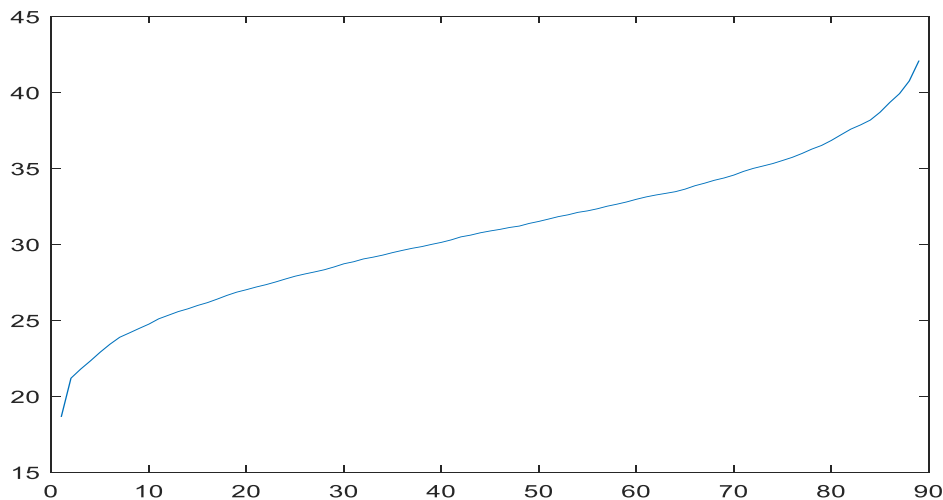
36	0,20	0,36	1,06	4,29	4,72	25,75
37	0,13	0,35	1,06	4,50	4,00	29,02
38	0,19	0,34	1,07	2,34	9,87	29,68
39	0,11	0,26	1,14	8,05	1,36	34,50
40	0,14	0,38	1,15	0,06	1,08	20,68
41	0,18	0,37	1,20	4,98	5,53	28,12
42	0,17	0,27	1,21	8,92	8,37	36,84
43	0,18	0,34	1,25	3,41	5,00	26,32
44	0,13	0,39	1,41	5,24	0,89	26,67
45	0,11	0,36	1,42	0,32	2,89	25,97
46	0,20	0,27	1,45	3,17	2,45	24,13
47	0,15	0,39	1,45	9,62	6,29	35,29
48	0,14	0,27	1,46	0,59	7,64	30,09
49	0,13	0,28	1,47	0,84	4,90	28,58
50	0,19	0,28	1,50	7,99	0,18	27,06
51	0,17	0,26	1,56	2,69	1,75	24,48
52	0,16	0,36	1,61	6,58	6,97	32,66
53	0,13	0,36	1,64	7,47	5,27	34,33
54	0,12	0,36	1,66	4,98	9,07	36,17
55	0,15	0,35	1,72	0,08	9,94	29,88
56	0,11	0,25	1,88	2,38	3,53	31,87
57	0,15	0,35	1,93	3,62	3,57	27,24
58	0,13	0,26	2,05	9,62	2,88	35,76
59	0,10	0,30	2,06	8,63	3,16	37,47
60	0,12	0,35	2,08	4,35	2,16	29,35
61	0,11	0,39	2,08	4,16	5,67	33,39
62	0,15	0,28	2,14	2,17	7,67	31,29
63	0,18	0,34	2,15	6,18	9,74	34,93
64	0,19	0,39	2,17	9,12	4,66	31,76
65	0,19	0,33	2,21	7,88	5,68	32,04
66	0,20	0,37	2,36	3,26	6,04	27,39
67	0,18	0,35	2,40	9,81	9,88	38,65
68	0,14	0,30	2,45	1,72	3,71	27,86
69	0,10	0,36	2,46	9,31	6,46	40,86
70	0,16	0,37	2,51	7,81	5,62	33,09
71	0,11	0,32	2,52	0,60	3,25	28,89
72	0,12	0,29	2,54	0,60	3,31	27,73
73	0,17	0,39	2,57	0,31	3,36	22,74
74	0,12	0,35	2,57	7,52	5,61	36,35
75	0,11	0,38	2,57	8,02	1,12	33,60
76	0,11	0,34	2,60	4,78	7,63	36,58
77	0,18	0,39	2,61	4,73	1,31	25,05
78	0,18	0,27	2,62	1,36	4,82	26,90
79	0,11	0,32	2,70	6,83	7,81	39,97
80	0,17	0,32	2,73	0,04	7,90	28,01
81	0,13	0,34	2,75	4,63	6,83	34,11
82	0,15	0,30	2,75	0,08	7,83	29,99
83	0,14	0,31	2,81	6,96	2,48	31,46
84	0,10	0,32	2,86	2,88	7,22	35,96
85	0,20	0,35	2,86	6,94	4,40	30,20

86	0,16	0,28	2,89	6,84	6,32	34,73
87	0,12	0,37	2,91	1,36	5,89	30,47
88	0,16	0,36	2,92	0,05	2,89	23,52
89	0,14	0,28	2,95	3,12	2,37	28,26
90	0,18	0,26	2,99	6,68	3,23	30,83
OPTIMISADO	0,15	0,33	1,51	4,80	5,21	30,53

Fuente: Elaboración propia

Se Realiza la gráfica de Pareto donde demuestra la solución óptima según las generaciones ganadoras posibles tal como se muestra en la **Figura 4-36**. Teniendo en cuenta que no se realizó ninguna restricción para la selección de valores.

Figura 4-36 Grafica de Pareto solución óptima



Fuente: Elaboración propia

Al optimizar el tiempo de ciclo maximizamos la productividad obteniendo una productividad de 101,4 bcm/h es decir un aumento con relación a los tiempos tomados en campo de 2,6 bcm/h que corresponde a 5168,31 U\$/ton ver **Tabla 4-16**

Tabla 4-16 Comparación de Datos AE - Campo

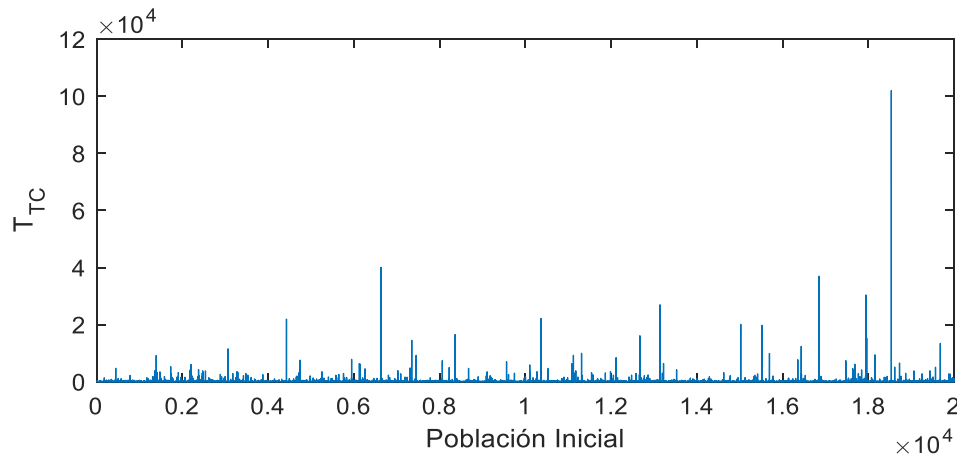
Datos	Tiempo total del ciclo de acarreo (tic)	Capacidad flota	productividad bcm/h	Bcm/ton	Bcm/día	Bcm /mes	Densidad	US/ton
				10,50	2	25	1,27	3
optimizado	30,53	3685,71	101,40	1064,73	2129,46	53236,50	67610,35	202831,06
campo	31,33	3685,71	98,82	1037,60	2075,20	51879,99	65887,58	197662,75

\$5.168,31

Fuente: Elaboración propia

Se realiza una segunda iteración para este caso colocaremos restricciones en la selección de nuestros posibles ganadores óptimos se toma nuevamente una población inicial de 20.000 cromosomas para llevar al algoritmo evolutivo, generaciones que son aplicadas al modelo de la función objetivo una velocidad máxima de ida de 25 Km/h y de 45 Km/h en la vuelta, para una distancia de 2.5 Km entre fuente y destino cuyos resultados de T_{TC} se muestran en la Figura 4-37 .

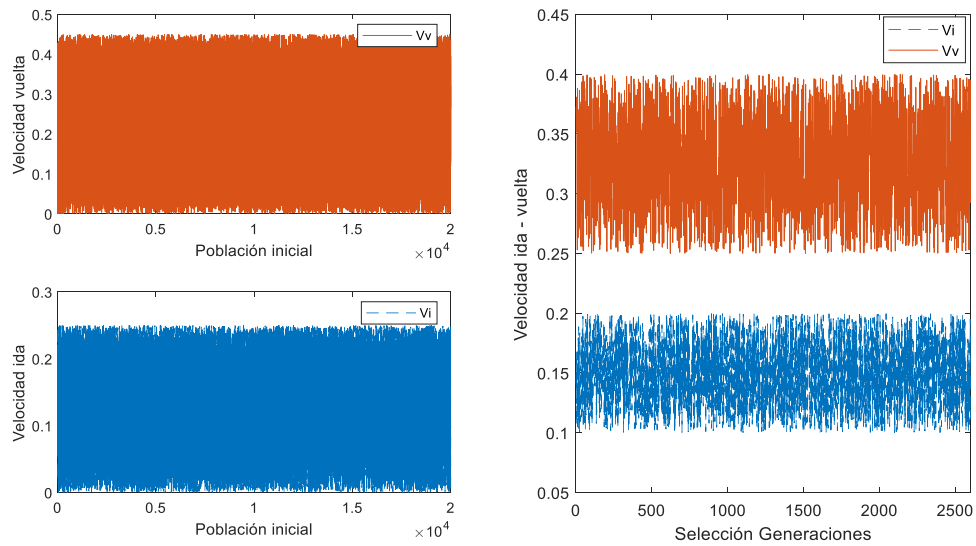
Figura 4-37 Población Inicial



Fuente: Elaboración propia

De la población inicial se seleccionan las generaciones que cumplen con las restricciones de velocidades de ida $10 < v_{ii} < 20$ (Km/h) y para las velocidades de vuelta entre $25 < v_{vi} < 40$ (Km/h), reduciendo significativamente las generaciones que cumplen con ambos criterios como se muestra en la Figura 4-38

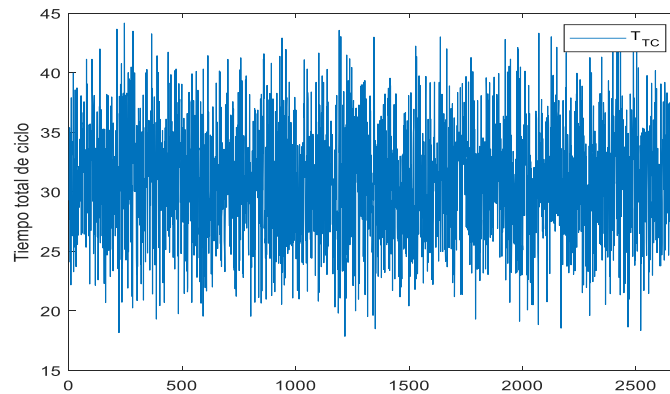
Figura 4-38 Selección de población por velocidad



Fuente: Elaboración propia.

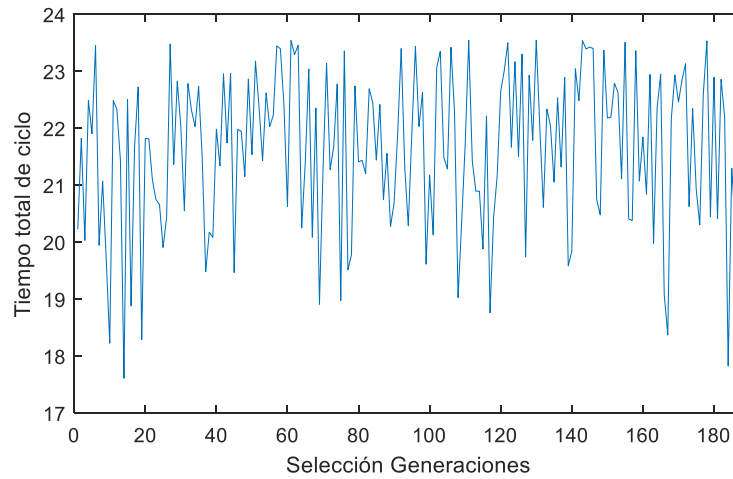
Para estas 2700 generaciones los rangos estimados para los tiempo totales de ciclo (T_{TC}) se muestran en la Figura 4-39.

Figura 4-39 Generación que cumple con rangos de velocidad



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta un tiempo de operación calculado de los datos en operación real de se detaremina un intervalo de operación de un 10% por debajo del tiempo ideal y un maximo de 150% de dicho valor de referencia, para los cuales 188 generaciones cumplen con la condiciones de clasificación planteadas, como se muestra en la Figura 4-40

Figura 4-40 Generación que cumple con rangos para T_{TC} 

Fuente: Elaboración propia.

Del algoritmos se obteniendo de los 20.000 cromosomas iniciales a las 188 que cumplen con el intervalo de tiempo idela, 37 de esas combinaciones corresponden a las tiempos de espera permitidos para llegar a un ciclo óptimo en la operación. En la Tabla 4-17 se organizan los valores optimos de velocidades de ida, velocidades de vuelta estimados en función a los tiempos de espera optimos.

Tabla 4-17 Valores óptimos estimados para t_e

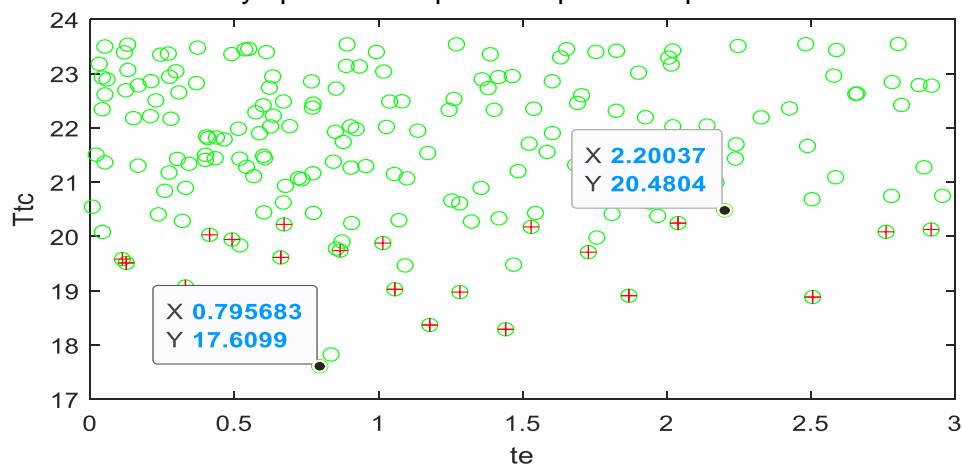
Opción	Velocidad Ida V_i (Km)	Velocidad Vuelta V_v (Km)	Tiempo de espera t_e
1	18.57	34.55	0.11
2	19.45	33.75	0.12
3	19.45	33.75	0.12
4	17.72	27.16	0.25
5	17.72	27.16	0.25
6	19.19	31.40	0.33
7	19.19	31.40	0.33
8	15.67	30.35	0.41
9	17.80	30.93	0.49
10	19.83	30.50	0.56
11	19.83	30.50	0.56
12	19.83	30.50	0.56
13	19.95	33.26	0.66
14	19.95	33.26	0.66
15	18.00	30.33	0.67
16	18.81	32.63	0.80
17	18.81	32.63	0.80
18	14.54	38.76	0.87

19	16.81	34.70	1.01
20	19.99	27.86	1.06
21	19.99	27.86	1.06
22	19.89	31.24	1.18
23	19.89	31.24	1.18
24	17.31	39.84	1.28
25	18.38	39.16	1.44
26	18.38	39.16	1.44
27	18.35	37.62	1.53
28	17.94	34.61	1.73
29	17.59	35.20	1.87
30	17.59	35.20	1.87
31	17.76	29.81	2.04
32	17.76	29.81	2.04
33	17.54	28.82	2.20
34	18.57	38.33	2.51
35	18.57	38.33	2.51
36	19.64	39.48	2.76
37	19.78	30.38	2.92

Fuente: Elaboración propia

Aplicando la optimización a los datos, considerado un máximo tiempo de espera de 3 minutos el resultado grafico del algoritmo resalta los tiempos de espera permitidos para que el proceso siga siendo óptimo (+), como se muestra en la Figura 4-41. Se relaciona en la grafica una de las posibles combinaciones sugeridas es: para un $te = 0.79$ min, se obtendría un $T_{TC} = 17.61$ min, y un $te = 2.20$ min ara un $T_{TC} = 20.48$ min

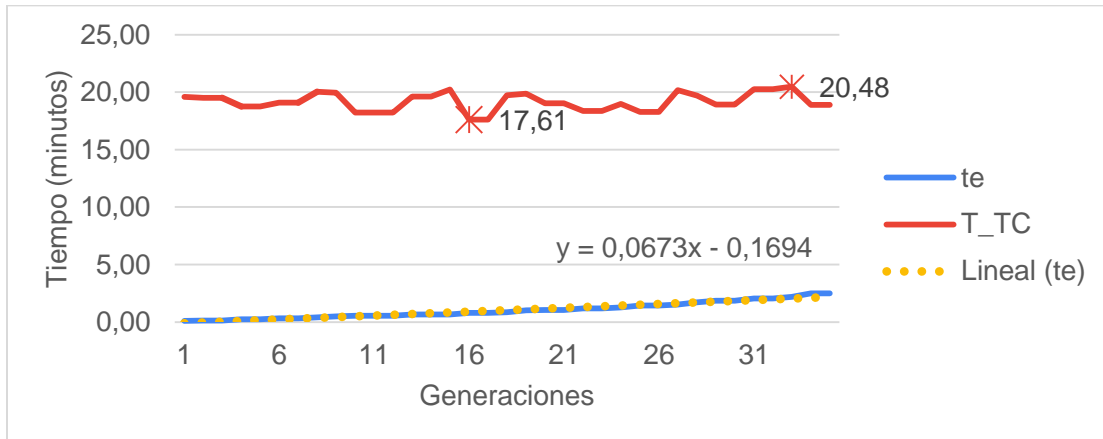
Figura 4-41 Selección y optimización para tiempos de espera te



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-42. se puede observar que se estima un máximo T_{TC} de 20,48 minutos y el ciclo muestra una ecuación de tendencia lineal para el tiempo de espera, como se observa

Figura 4-42 Tendencia Tiempo de espera vs Tiempo de ciclo Total



Fuente: Elaboración propia.

Se repite el procedimiento en las 188 generaciones seleccionadas buscando ahora valores óptimos para el tiempo de incertidumbre en el tiempo de viaje de ida que se cataloga tx relacionados en la encontramos que el tiempo máximo tx permitido es de 4,22 minutos como se observa en el Tabla 4-18.

Tabla 4-18 Valores óptimos estimados para tx

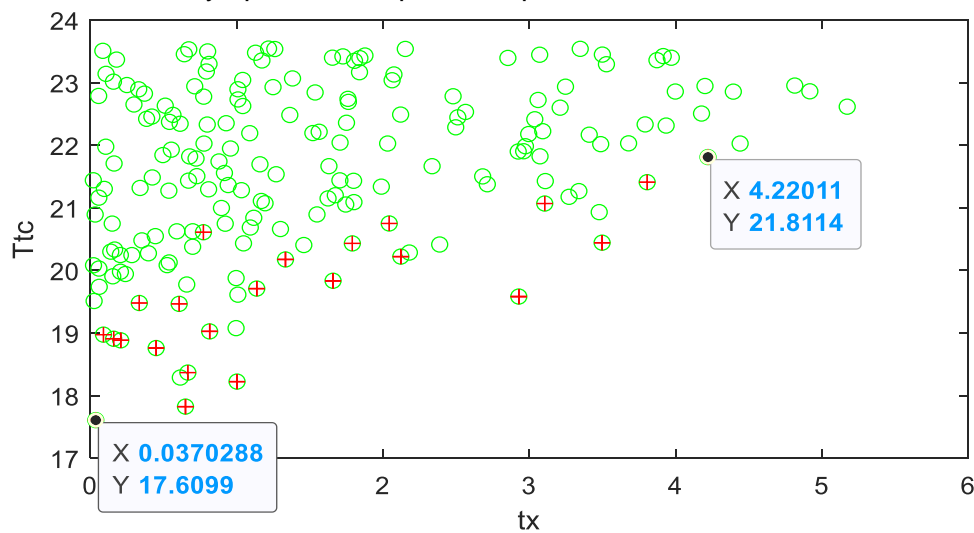
Opción	Velocidad Ida V_i (Km)	Velocidad Vuelta V_v (Km)	Tiempo de espera te	Tiempo variable ida tx
1	18.81	32.63	0.80	0.04
2	17.31	39.84	1.28	0.09
3	17.59	35.20	1.87	0.16
4	18.57	38.33	2.51	0.21
5	18.57	38.33	2.51	0.21
6	17.93	38.04	1.47	0.33
7	17.72	27.16	0.25	0.45
8	17.72	27.16	0.25	0.45
9	17.23	33.92	1.09	0.61
10	18.99	37.29	0.83	0.65
11	18.99	37.29	0.83	0.65
12	19.89	31.24	1.18	0.67
13	15.47	35.00	1.28	0.77
14	19.99	27.86	1.06	0.82
15	19.99	27.86	1.06	0.82

16	19.83	30.50	0.56	1.00
17	19.83	30.50	0.56	1.00
18	17.94	34.61	1.73	1.14
19	17.94	34.61	1.73	1.14
20	18.35	37.62	1.53	1.33
21	18.35	37.62	1.53	1.33
22	19.68	33.44	0.52	1.66
23	19.68	33.44	0.52	1.66
24	19.68	33.44	0.52	1.66
25	19.54	31.36	1.54	1.79
26	19.35	35.76	2.08	2.04
27	18.00	30.33	0.67	2.12
28	18.00	30.33	0.67	2.12
29	18.57	34.55	0.11	2.93
30	18.57	34.55	0.11	2.93
31	18.57	34.55	0.11	2.93
32	19.53	31.15	1.10	3.10
33	19.24	33.54	0.60	3.50
34	19.24	33.54	0.60	3.50
35	18.95	33.87	0.40	3.80
36	16.97	39.16	0.41	4.22
37	16.97	39.16	0.41	4.22

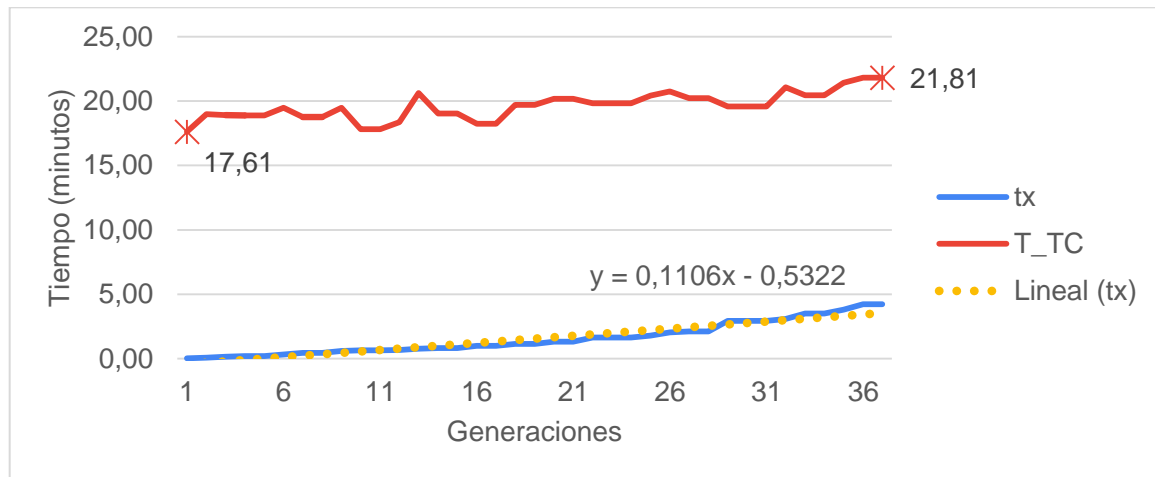
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-43 resalta los tiempos variables de ida permitidos para que el proceso siga siendo óptimo (+), y la tendencia lineal como se observa en la Figura 4-44

Figura 4-43 Selección y optimización para tiempos variable de ida tx



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-44 Tendencia Tiempo variable de ida vs Tiempo de ciclo Total

Fuente: Elaboración propia

Se procede a optimizar las 188 generaciones en función de los tiempos de variables de vuelta t_y y sus resultados se muestran Tabla 4-19, resaltando como tiempo t_y máximo permitido de 4.84 minutos.

Tabla 4-19 Valores óptimos estimados para t_y

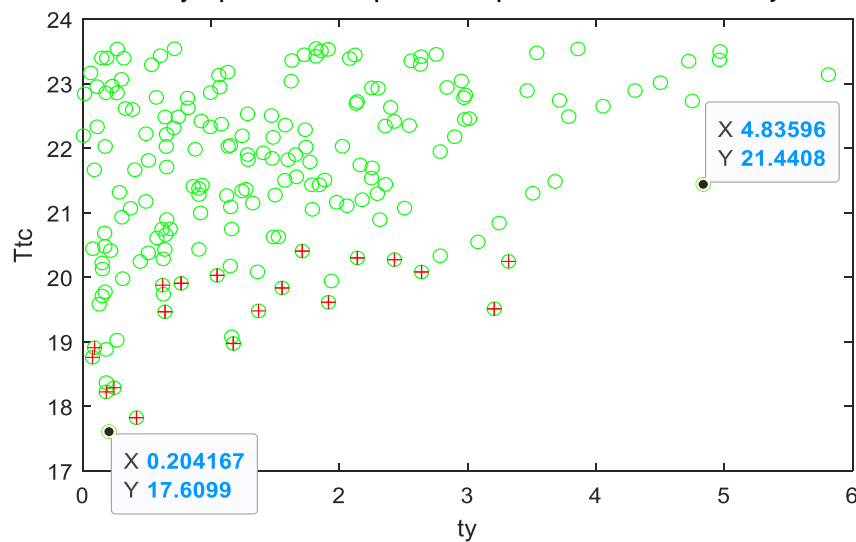
Opción	Velocidad Ida V_i (Km)	Velocidad Vuelta V_v (Km)	Tiempo de espera t_e	Tiempo variable ida t_x	Tiempo variable vuelta t_y
1	17.72	27.16	0.25	0.45	0.08
2	17.59	35.20	1.87	0.16	0.09
3	19.83	30.50	0.56	1.00	0.18
4	18.81	32.63	0.80	0.04	0.20
5	18.81	32.63	0.80	0.04	0.20
6	18.38	39.16	1.44	0.61	0.24
7	18.99	37.29	0.83	0.65	0.42
8	18.99	37.29	0.83	0.65	0.42
9	16.81	34.70	1.01	1.00	0.62
10	17.23	33.92	1.09	0.61	0.64
11	17.23	33.92	1.09	0.61	0.64
12	17.47	27.14	0.87	0.15	0.77
13	17.47	27.14	0.87	0.15	0.77
14	17.47	27.14	0.87	0.15	0.77
15	15.67	30.35	0.41	0.06	1.05
16	15.67	30.35	0.41	0.06	1.05
17	17.31	39.84	1.28	0.09	1.17
18	17.31	39.84	1.28	0.09	1.17
19	17.31	39.84	1.28	0.09	1.17

20	17.93	38.04	1.47	0.33	1.37
21	19.68	33.44	0.52	1.66	1.55
22	19.68	33.44	0.52	1.66	1.55
23	18.78	29.93	0.24	1.46	1.71
24	18.78	29.93	0.24	1.46	1.71
25	19.95	33.26	0.66	1.01	1.91
26	19.95	33.26	0.66	1.01	1.91
27	17.20	35.46	1.07	0.14	2.14
28	17.20	35.46	1.07	0.14	2.14
29	18.81	36.13	1.32	0.40	2.43
30	18.81	36.13	1.32	0.40	2.43
31	18.48	28.50	0.04	0.02	2.64
32	18.48	28.50	0.04	0.02	2.64
33	19.45	33.75	0.12	0.03	3.21
34	19.45	33.75	0.12	0.03	3.21
35	19.92	34.98	0.91	0.21	3.32
36	17.96	39.47	0.43	0.02	4.84
37	17.96	39.47	0.43	0.02	4.84

Fuente: Elaboración propia

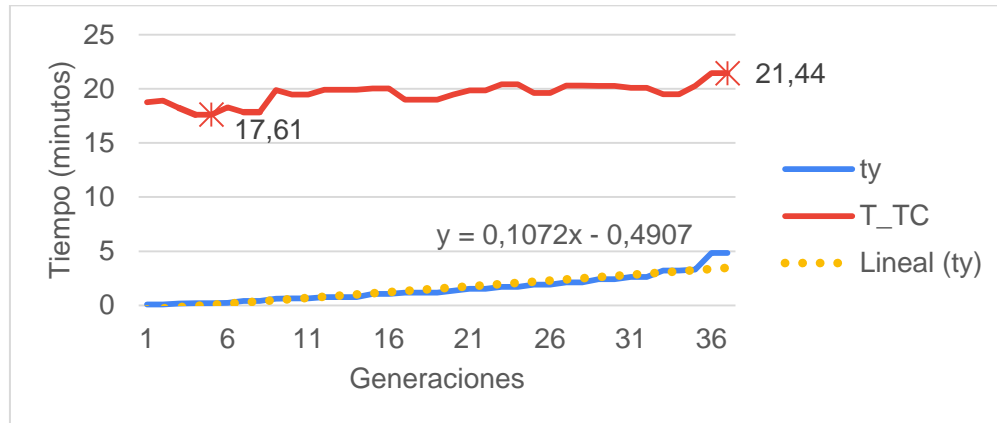
Por otra parte el análisis gráfico de los resultados optimos para t_y , arroja unos valores de $t_y = 0.20$ min, se obtendría un $T_{TC} = 17.61$ min, y un $t_y = 4.84$ min para un $T_{TC} = 21.44$ min, como se muestra en la Figura 4-45.

Figura 4-45 Selección y optimización para tiempos variable de ida t_y



Fuente: Elaboración propia

La ecuación de la tendencia del tiempo de variación de vuelta (t_y) siguiendo una tendencia lineal como se observa en el Figura 4-46

Figura 4-46 Tendencia Tiempo variable de vuelta vs Tiempo de ciclo Total

Fuente: Elaboración propia

De los 188 cromosomas se la optimización con base en el tiempo total de ciclo arrojándonos un promedio de tiempo de ciclo total de 21,53 minuto ver Tabla 4-20 obteniendo una reducción en el tiempo de ciclo de 1,82 minutos con relación a los tiempos tomados en campo. Este sistema nos arroja una gama de valore posibles en el que podríamos alcanzar nuestro ciclo optimo teniendo en cuentas una condiciones de Velocidades y distancia.

Tabla 4-20 Relación tiempo total de ciclo total T_{TC} optimo

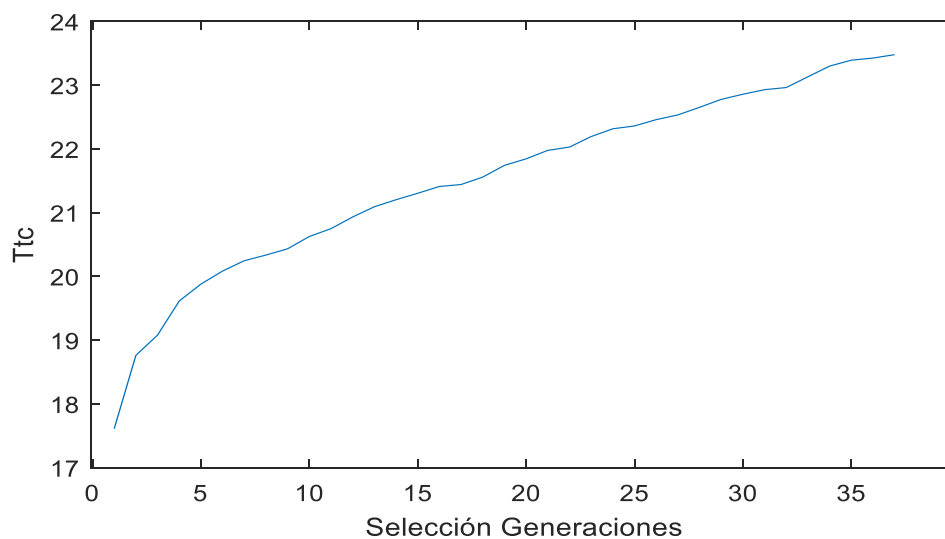
Opción	Velocidad Ida V_i (Km)	Velocidad Vuelta V_v (Km)	Tiempo espera t_e	Tiempo variable ida t_x	Tiempo variable vuelta t_y	Tiempo Total de ciclo T_{TC}
1	18.81	32.63	0.80	0.04	0.20	17.61
2	17.72	27.16	0.25	0.45	0.08	18.76
3	19.19	31.40	0.33	1.00	1.16	19.08
4	19.95	33.26	0.66	1.01	1.91	19.61
5	16.81	34.70	1.01	1.00	0.62	19.88
6	18.48	28.50	0.04	0.02	2.64	20.08
7	17.76	29.81	2.04	0.28	0.45	20.25
8	18.32	39.71	1.42	0.17	2.79	20.33
9	15.43	37.65	0.77	1.05	0.90	20.43
10	18.97	31.89	1.94	0.59	1.48	20.63
11	17.96	36.30	2.96	0.15	1.16	20.75
12	19.40	31.63	0.68	3.48	0.30	20.93
13	19.44	39.10	2.58	1.80	1.15	21.09
14	18.61	39.38	1.48	1.67	2.18	21.20
15	16.02	35.94	0.17	0.10	3.51	21.30
16	18.95	33.87	0.40	3.80	0.86	21.41
17	17.96	39.47	0.43	0.02	4.84	21.44

18	19.39	26.52	1.58	0.92	1.66	21.56
19	15.35	37.02	0.88	0.88	2.16	21.74
20	14.19	30.62	0.40	0.50	1.48	21.84
21	18.78	38.81	0.92	0.11	5.10	21.98
22	18.11	32.90	2.02	2.03	1.13	22.03
23	18.49	27.66	2.33	1.09	1.24	22.19
24	18.58	39.76	1.82	3.93	0.71	22.31
25	17.70	36.31	2.43	1.75	1.58	22.36
26	18.71	28.21	1.69	0.42	3.01	22.46
27	17.60	30.60	1.26	2.56	1.28	22.53
28	15.03	37.38	0.31	0.30	4.06	22.65
29	16.28	29.69	2.92	0.77	0.82	22.78
30	17.29	31.55	0.77	4.39	0.27	22.86
31	13.51	35.40	0.04	1.25	2.30	22.93
32	12.91	35.00	2.58	0.25	0.23	22.96
33	13.70	36.48	0.93	2.07	1.06	23.13
34	15.73	31.99	1.63	0.81	2.63	23.30
35	16.03	25.03	0.12	1.84	2.08	23.39
36	19.84	36.47	2.02	3.91	1.82	23.42
37	16.39	28.37	0.37	1.13	3.54	23.48

Fuente: Elaboración propia

Se obtiene la gráfica de Pareto donde demuestra la solución óptima según las generaciones ganadoras tal como se muestra en la Figura 4-47.

Figura 4-47 Grafica de Pareto solución óptima



Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, para comprar los datos de campo Tabla 4-21 con relación a lo arrojado en nuestro algoritmo evolutivo tomaremos valores para comparar valores de campo a una distancia de 2,5 km.

Tabla 4-21 muestra de campo distancia 2,5km

Mach	Distancia Km	PT-EP	PT-CC	PT-VF	PT-VV	PT-TC
EX3600/793D	2,450	3,195	7,275	13,680	0,22	31,075
RH120-E/EH3500	2,493	2,543	8,010	7,127	6,00	28,800

Fuente: Elaboración propia.

El promedio de los datos óptimos tenemos que se podría llegar a una optimización de 185,02 bcm/h ya que tenemos en promedio una reducción del ciclo hasta un máximo de 5,6 minutos y un mínimo de 1,36 minutos como se observa en la Tabla 4-22

Tabla 4-22 tabla comparativa bcm

Origen de los datos	vi	vv	te	tx	tc	tcc	ty	ttc	Número de camiones	Productividad bcm/h	Diferencia bcm/h
Optimización	21,0	30,0	1,2	1,3	3,1	5,6	1,7	21,5	3,8	185,0	51,75
Campo	21,0	30,0	4,5	0,0	3,1	7,6	0,0	30	4	132,80	

Fuente: Elaboración propia

El costo de 1Bcm corresponde a 3 U\$ portal razón podemos decir que con nuestro algoritmo tendríamos una productividad mes de 96.890,2 bcm/mes que corresponden a \$290.670,5 U\$/MES es decir 27.170,2 bcm/mes por encima de lo producido según datos lo que implica que se deje de percibir 81.510,46U\$/bcm de campo como se observa Tabla 4-23.

Tabla 4-23 Tabla comparativa US/BCM

Origen de los datos	Productividad bcm/h	Diferencia bcm/h	bcm/turno	bcm/día	bcm /mes	US/bcm
Referencias			10,5	2,0	25	3,0
OPTIMO	185,0	51,75	1937,8	3875,6	96890,2	290670,5
CAMPO	132,80		1394,4	2788,8	69720,0	209160,0
						\$81.510,46

Fuente: Elaboración propia

Se realiza la **Figura 4-47** Grafica de Pareto solución óptima el gráfico de Pareto donde demuestra la solución óptima según las 70 generaciones ganadoras posibles

mostrándonos la optimización del nuestro sistema bajo las condiciones establecidas para el análisis e interpretación de datos, pues el algoritmo nos da la flexibilidad de ajustarlo a las condiciones que queremos evaluar dándonos un rango máximo y mínimo de posibilidad como se muestra en el ejercicio de aplicación.

En la investigación se busca incluir el concepto Factor de Asignación de Camiones, el cual se expresa en porcentaje, donde lo ideal sería un 100% pero en una industria minera nunca será posible ya que nos indicaría una flota de camiones demasiado grande, la cual no es económicamente factible, por lo cual se genera un modelo en el cual nos arroja una curva la cual nos indica que para una óptima asignación se debe estar en un rango no mayor de 80 a 90 % el cual nos muestra que cierto número de camiones sería el óptimo ver.

El Factor de Asignación de Camiones se calcula de la siguiente manera, tal como se muestra en la Ecuación 13:

$$\text{factor de asignacion de camion} = \frac{\text{No Total de camione asignado}}{\text{No total de camiones requeridos}} \quad (13)$$

Ejemplo:

Total Horas de Camiones Asignados en el mes de Enero: 9.98

Total Horas de Camiones Requeridos en el mes de Enero: 12.80

Reemplazando en la ecuación:

Factor de Asignacion de Camiones=9.98/12.80

Factor de Asignacion de Camiones=0.7798=78%

Si llevamos este concepto a nuestro caso de estudio y observamos en la tabla que tendríamos un factor de asignaciones de camión del 95% calculado de la siguiente manera

$$\text{factor de asignacion de camion} = \frac{\text{No Total de camione asignado}}{\text{No total de camiones requeridos}}$$

Factor de Asignacion de Camiones=4/3,7

Factor de Asignacion de Camiones=1,08=108%

Es decir hay una sobre asignación del 0,8% de camiones generando esperas en el proceso, lo que demuestra que en campo no se tienen en cuenta las variaciones de la operación que para nuestro caso de estudio los hemos denominado (tx) y (ty) como se observa Tabla 4-24.

Tabla 4-24 Caculo de número de camiones (AGMO)

Ítems	Velocidad de ida (vi)	de Velocidad de vuelta (vv)	Tiempo de espera (te)	de Tiempo variable de ida (tx)	Tiempo de cargue (tc)	del Tiempo total ciclo cargue (ttcc)	de Tiempo variable vuelta (ty)	de Tiempo total ciclo (ttc)	# de camiones	Productividad bcm/h	Diferencia bcm/h
1	18,81	32,63	0,80	0,04	3,11	4,50	0,20	17,61	3,91	226,24	79,23
2	17,72	27,16	0,25	0,45	3,11	3,81	0,08	18,76	4,93	212,35	65,34
3	19,19	31,40	0,33	1,00	3,11	4,44	1,16	19,08	4,30	208,81	61,80
4	19,95	33,26	0,66	1,01	3,11	4,78	1,91	19,61	4,10	203,12	56,11
5	16,81	34,70	1,01	1,00	3,11	5,12	0,62	19,88	3,88	200,42	53,41
6	18,48	28,50	0,04	0,02	3,11	3,17	2,64	20,08	6,33	198,37	51,36
7	17,76	29,81	2,04	0,28	3,11	5,43	0,45	20,25	3,73	196,78	49,77
8	18,32	39,71	1,42	0,17	3,11	4,69	2,79	20,33	4,33	195,92	48,91
9	15,43	37,65	0,77	1,05	3,11	4,93	0,90	20,43	4,14	194,98	47,97
10	18,97	31,89	1,94	0,59	3,11	5,64	1,48	20,63	3,66	193,16	46,15
11	17,96	36,30	2,96	0,15	3,11	6,22	1,16	20,75	3,34	192,01	45,00
12	19,40	31,63	0,68	3,48	3,11	7,26	0,30	20,93	2,88	190,33	43,32
13	19,44	39,10	2,58	1,80	3,11	7,50	1,15	21,09	2,81	188,89	41,88
14	18,61	39,38	1,48	1,67	3,11	6,27	2,18	21,20	3,38	187,91	40,90
15	16,02	35,94	0,17	0,10	3,11	3,37	3,51	21,30	6,32	187,02	40,00
16	18,95	33,87	0,40	3,80	3,11	7,31	0,86	21,41	2,93	186,08	39,07
17	17,96	39,47	0,43	0,02	3,11	3,56	4,84	21,44	6,02	185,81	38,80
18	19,39	26,52	1,58	0,92	3,11	5,61	1,66	21,56	3,84	184,81	37,80
19	15,35	37,02	0,88	0,88	3,11	4,87	2,16	21,74	4,47	183,25	36,23
20	14,19	30,62	0,40	0,50	3,11	4,01	1,48	21,84	5,45	182,39	35,38
21	18,78	38,81	0,92	0,11	3,11	4,14	5,10	21,98	5,31	181,28	34,27
22	18,11	32,90	2,02	2,03	3,11	7,16	1,13	22,03	3,08	180,86	33,85
23	18,49	27,66	2,33	1,09	3,11	6,53	1,24	22,19	3,40	179,52	32,51
24	18,58	39,76	1,82	3,93	3,11	8,87	0,71	22,31	2,52	178,54	31,53
25	17,70	36,31	2,43	1,75	3,11	7,29	1,58	22,36	3,07	178,18	31,17
26	18,71	28,21	1,69	0,42	3,11	5,22	3,01	22,46	4,30	177,40	30,38
27	17,60	30,60	1,26	2,56	3,11	6,93	1,28	22,53	3,25	176,81	29,80
28	15,03	37,38	0,31	0,30	3,11	3,72	4,06	22,65	6,10	175,88	28,87
29	16,28	29,69	2,92	0,77	3,11	6,80	0,82	22,78	3,35	174,92	27,91
30	17,29	31,55	0,77	4,39	3,11	8,27	0,27	22,86	2,76	174,30	27,29
31	13,51	35,40	0,04	1,25	3,11	4,40	2,30	22,93	5,21	173,76	26,75
32	12,91	35,00	2,58	0,25	3,11	5,94	0,23	22,96	3,87	173,51	26,49
33	13,70	36,48	0,93	2,07	3,11	6,12	1,06	23,13	3,78	172,24	25,23
34	15,73	31,99	1,63	0,81	3,11	5,55	2,63	23,30	4,20	171,00	23,99
35	16,03	25,03	0,12	1,84	3,11	5,07	2,08	23,39	4,61	170,32	23,31
36	19,84	36,47	2,02	3,91	3,11	9,04	1,82	23,42	2,59	170,08	23,07
37	16,39	28,37	0,37	1,13	3,11	4,61	3,54	23,48	5,09	169,69	22,68

Factor Camión

1,08

108%

Fuente: Elaboración propia

En la aplicación de nuestro algoritmo genético mono objetivo propuesto encontramos que se logra una disminución en los tiempos permitiendo la maximización de la productividad gracias a que la herramienta propuesta permite una flexibilidad de programación dependiendo de la población y rangos que el evaluador desea analizar.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

De los resultados obtenidos de la validación del Algoritmo evolutivo propuesto y comparaciones realizadas con lo reportado en la literatura, se puede concluir lo siguiente:

La herramienta desarrollada mediante el uso de Algoritmo evolutivo ((AGMO) propuesta en este trabajo permite obtener los tiempos de ciclo óptimos, con una reducción considerable en los tiempos de espera T_e y tiempos de incertidumbre en el viaje de ida (t_x) y tiempos de incertidumbre de vuelta (t_y), indicándonos las velocidades a los que los equipos deberían transitar y las reducciones asociadas en una mina a cielo abierto de carbón. Los resultados muestran que, mediante este tipo de algoritmo se puede aportar información que permite mejorar considerablemente las productividades y tomar decisiones.

La herramienta desarrollada es flexible permitiendo ajustarse a las condiciones que se desean estudiar tanto en población a evaluar y parámetros a utilizar entregando rangos de máximos y mínimos que le permiten al evaluador analizar los escenarios adecuados y validad en función de la toma de decisiones que se verá reflejada en la planeación a corto plazo de la minería.

La formulación del (AGMO) permitió mediante la definición de las funciones objetivo, restricciones y variables de optimización, obtener los tiempos de ciclo óptimos de los sectores de estudio (CD- A) y los Tiempos mínimos y máximos de esperas permitidos con la finalidad de obtener el ciclo optimo con la finalidad de aumentar la productividad de teniendo en cuenta las diferentes combinaciones o Mach establecidos.

El tamaño de la población de individuos para la validación del (AGMO) incide considerablemente en la calidad de los resultados arrojados, principalmente en este tipo de problemas de optimización.

Se logró definir y aplicar el concepto del Factor de Asignación de Camiones, este factor ayuda a identificar cual es el número óptimo de camiones que debe tener la operación. Con este concepto se crearán nuevas bases que le permitan a las empresas la identificación de los ciclos y su mejora, la cual sería una gran ayuda para despacho y generar una asignación adecuada de los camiones haciendo que la producción y costos de este sistema ayudado a la elaboración de un modelo de costos.

En los ejercicios aplicados el algoritmo arroja una gama de posibilidades de tiempos de espera permitidos y T_x y T_y para que nuestro ciclo sea óptimo en el primer ejercicio se tiene una reducciones ciclo mínima de 1,22 y máxima de 4,3 minutos que corresponden a un aumento de 2,3 bcm/h.

En la segunda muestra a 2,5 km se arroja una muestra de 70 posibles ganadores que arrojaron una optimización de 185 bcm/h ya que tenemos en promedio una reducción del ciclo hasta un máximo de 5,3 minutos y un mínimo de 1,36 minutos y se determinó el factor camiones que nos arroja un 108% por ciento que relaciona una sobre estimación de flota de camiones del 8%.

La cantidad de camiones en el ejercicio de aplicación a una distancia de 2,5 km según los datos en campo es mayor de 4 camiones con la herramienta del algoritmo evolutivo mono objetivo determinamos que en promedio el número de camiones asignado debe ser de 3,8 que llevamos a un modelo económico podría arrojar las reducciones de costos asociados (combustible, reparación respuestas)

El tonelaje extraído por los datos de campo es menor que por el algoritmo planteado ya que con los 3,8 camiones se encuentra por encima del tonelaje extraído que con los 4,3 camiones, en otras palabras, con el aumento de camiones la producción se mantiene estable ya que esta al máximo el rendimiento de las maquinas, además si se aumenta la cantidad de camiones es porque aumentan los tiempos de espera produciendo colas.

La productividad calculada en el modelo considera el tiempo de ciclo en su forma más simple, la cual corresponde a tiempo de viaje cargado y descargado junto con tiempos

de carga y descarga. El algoritmo incorpora distintos perfiles de velocidad en la ruta lo que permite tener un valor más preciso a la hora de resolver el problema.

Los costos por mantenimiento disminuyen al tener menos maquinas en la operación.

Con este modelo se podría poner en práctica en cualquier tipo de minería a cielo abierto ya que esta las variaciones de diseño no son tan variantes además lo único que cambia en otras minas son los tiempos que se generan internamente.

5.2 Recomendaciones

A partir de lo desarrollado en este trabajo, se podrán realizar las siguientes recomendaciones:

En primera instancia, la metodología de optimización y simulación es bastante genérica debido a que se consideran variaciones operacionales para resolver un problema de optimización. Tanto las variaciones operacionales, como el modelo de optimización, pueden ser cambiados a la hora de determinar el tiempo de ciclo óptimo de un sistema , por lo que se pueden probar distintas configuraciones que busquen otro objetivo, como minimizar costos de operación y desviaciones con el plan o que aumenten índices operativos como disponibilidad y utilización.

Se recomienda plantear en minería de carbón el algoritmo genético multiobjetivo que permita plantear un modelo de costos, que permita demostrar la saturación de la asignación de camiones que proporcione la tasa de producción optima al menor costo por metro cubico banco, mostrando a su vez el impacto de los costos y producción que se genera con esta.

Se debe modificar la simulación continuamente de acuerdo a los tiempos que se generen por tramos más no la estructura del programa ya que lo que cambia son las extensiones de los tramos y no la estructura de mina. Cada frente es especial y único por eso se genera un modelo por método a menos que se haga un programa complejo.

Hacer un estudio con otro tipo de máquinas ya que se cree que esas no son las mejores para el tipo de operación que se tiene.

Por otro lado, desde los resultados de mediano plazo se puede observar la disminución de la productividad en el tiempo, y la baja en los índices de utilización de los equipos de cargue. En particular se podría utilizar este tipo de análisis para determinar cuándo es conveniente realizar inversiones de equipos (como palas o camiones).

Finalmente, esta metodología se podría extender al largo plazo, en donde se podría observar la pérdida productiva real que tendría la operación, con el objetivo de retroalimentar planes de producción para que estos realmente se puedan cumplir.

6. Anexo:

Los anexos se adjuntaran vía digital en respectivas base de datos en Excel

Anexo 1 Base de datos campo

Anexo 2 Programación de simulación

Anexo 3 Base de Datos resultado de la simulación

7. Bibliografía

Nageshwaraniyer, S., Meng, C., Maghsoudi, A., & Dessureault, S. (2013). Data-driven modeling and simulation framework for material handling systems in coal mines. *Computers & Industrial Engineering.*, 766-779.

Niño Carlos, Molina Sandra. (2014). *Análisis comparativo en los ciclos de acarreo por medio de muestreo y actualización de datos en software talpac de la mina calenturitas, propiedad de c.i. prodeco s.a. en el municipio de la loma, cesar.* VALLEDUPAR.

Scribd . (27 de Mayo de 2014). Recuperado el 22 de Noviembre de 2020, de <https://es.scribd.com/doc/226307415/3Seleccion-de-Equipos-Mineros>

Ahangaran, M., & Kaveh, A. (2012). Discrete cost optimization of composite floor system using social harmony search model. *Applied Soft Computing*, 372-381.

Anirudh, K., Niels, A., & Z, R. (2017). Planning of truck platoons: A literature review and directions for future research. *Transportation Research Part B: Methodological*, 212-228.

Apaza Risco, E. D. (2017). *Disminución de tiempos improductivos para incrementar la utilización de los equipos de carguío y acarreo en la mejora continua de la productividad en el tajo Chalarina en Minera Shahuindo S.A.C.* universidad Nacional de trujillo.

Araujo, R. W. (2018). *Optimización de la flota de volquetes en acarreo, para incrementar la producción en la mina los andes.* Trujillo, Perú.

Arias, F. (2012). *El Proyecto de Investigación.* Caracas: Episteme.

Asencio, M. (2017). *Palas en Minería.* Cajamarca.: Universidad de Cajamarca.

B. De Souza, W. F. (2018). *Proceeding del II Congreso Iberoamericano en Minería.* Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Bakhtavar, E., & Mahmoudi, H. (2019). Development of a scenario-based robust model for the optimal truck-shovel allocation in open-pit mining. *Computers & Operations Research.*

- Barranco, M. J. (2010). *Tesis de Doctorado Analisis Multiobjetivos para la Optimizacion*. Medellin: Universidad Nacional.
- Barrientos, V. (2014). *Análisis de factores operacionales en detenciones y productividad de sistema de carguío y transporte en minería a cielo abierto*. Santiago de Chile.
- Barrientos, V. M. (2014). *Analisis de Factores Operacionales en detenciones y Poductividad de Sistema de Cargue y Transporte en Minería a Cielo abierto*. Santiago de Chile.
- Bastos, G. (2013). Decision making applied to shift change in stochastic open-pit mining truck dispatching? *IFAC Proceedings Volumes*.
- Billene, R. (2004). *Análisis de costos*. . Bogota. D.C.: Ediciones Jurídicas Cuyo.
- Bitarafan, M., & Atei, M. (2004). Mining method selection by multiple criteria decision making tools. *Journal- South African Institute of Mining and Metallurgy*, 493-498.
- Biteus, J., & Lindgren, T. (2017). Planning Flexible Maintenance for Heavy Trucks using Machine Learning Models, Constraint Programming, and Route Optimization. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 306-315.
- Burt, C. &. (2009). Equipment Selection for Surface Mining: A Review. *The Institute for Operations Research and the Management Sciences*.
- Burt, C., Caccetta, L., Hill, S., Welgama, P., Zerger, A., & Argent, R. (2008). Models for mining equipment selection. *Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, (págs. 1730-1736).
- CARLOS MARTINEZ NIÑO, S. M. (2014). *Análisis comparativo en los ciclos de acarreo por medio de muestreo y actualización de datos en software talpac de la mina calenturitas, propiedad de c.i. prodeco s.a. en el municipio de la loma, cesar*. VALLEDUPAR.
- Caterpillar. (06 de julio de 2019). *Caterpillar*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2020, de https://www.cat.com/es_MX/products/new/equipment/off-highway-trucks/miningtrucks/18093014.html
- Cerda, H. (1998). *Los Elementos de la Investigación*. Bogota D.C.: El Búho LTDA.
- Chaowasakoo, P. (2017). Improving fleet management in mines: The benefit of heterogeneous match factor. *Euroean Journal Of Operational Research*.
- Chavez, F. (2016). *Optimización de la Producción en Carguío y Acarreo mediante la utilización del sistema Jigsaw - Leica en Minera Toquepala*.

- Chen, T. (2012). A job-classifying and data-mining approach for estimating job cycle time in a wafer fabrication factory. *International journal of advanced manufacturing technology*.
- Creswell, J. W. (2009). *Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. DESING: Los angeles.
- Czaplicki, J. (2009). Shovel-Truck System. CRC Press Taylor and Francis Group. .
- Czaplicki, J. (2014). *Statistics for Mining Engineering*. Zambia: CRC Press.
- De Giovanni, L. (2017). A Heuristic for Multiattribute Vehicle Routing Problems in Express Freight Transportation. *scopus*.
- Doig Patrick, Kizil Mehmet S. (2013). *Mejoras en las estimaciones de requerimiento de camiones usando análisis detallado de transporte*. Australia: University of Wollongong, Queensland.
- Ercelebi, S., & Bascetin, A. (2009). Optimization of shovel-truck system for surface mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 433-439.
- Escobar, J. (2013). Optimización de una red de distribución con parámetros estocásticos usando la metodología de aproximación por promedios muestrales. *Ingeniería y Desarrollo*.
- Esmoris, A. (2013). Algoritmos Heuristicos. Madrid, España: EIO.
- Fuentes, Y. A. (2017). *Optimización de materiales de excavación de reutilización Industrial (MERI) de la mina de carbón "CERROLARGO" para la infraestructura vial mediante algoritmos evolutivos*. BOGOTÁ D.C.
- Garcés, D., & Castrillón, O. (2017). Diseño de una Técnica Inteligente para Identificar y Reducir los Tiempos Muertos en un Sistema de Producción. *Información tecnológica*, 157-170.
- Giliani, S., & Sttarvand, J. (2016). Integrating geological uncertainty in long-term open pit mine production planning by ant colony optimization. *Computers & Geosciences*, 31-40.
- González, H. (2017). *Selección y asignación óptima de equipos de carguío para el cumplimiento de un plan de producción en minería a cielo abierto*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Goodfellow, R., & Dimitrakopoulos, R. (2012). Algorithmic integration of geological uncertainty in pushback designs for complex multi-process open pit mines. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology* , 67-77.

Grimaldo, G. (2017). *Disponibilidad de equipos auxiliares para optimizar la productividad en el carguío y acarreo de las fases 01,03 y 07 del tajo Constanca empresa especializada*. STRACON GYM S.A.

Gurgur, H., & Uzuner, Y. (2011). Examining the implementation of two co-teaching models: team teaching and station teaching. *International Journal of Inclusive Education*, 589-610.

Hartman, H. L., & Mutmanský, J. M. (2002). *Introduction to mining engineering*. . Canada: John Wiley & Sons.

Jara, F. (2018). *Modelo integrado de simulación y optimización para planes mineros de mediano plazo en minería a cielo abierto*. CHILE: Facultad de ciencias Físicas y matemáticas Departamento de Ingeniería de Minas.

Jaramillo, P., Branch, J., & Sepulveda, G. (2012). PLANEAMIENTO DE MINAS A CIELO ABIERTO MEDIANTE OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA. *Ciencias de la Tierra*.

Kumral, M., & Ozer, U. (2013). Planning additional drilling campaign using two-space genetic algorithm: A game theoretical approach. *Computers & Geosciences*, 117-125.

Lins, O., Cano, A., & Arroyo, C. (2018). Dimensionamiento de flota en las operaciones de carguío y transporte usando modelos de simulación de sistemas. *INTERFASES*, 43-55.

M. Govinda Raj, Harsha Vardhan, Y.V. Rao. (2009). Production optimisation using simulation models in mines: a critical review. *Inderscience*, 330-359.

Manriquez Leon, F. A. (2015). *Evaluación de la incertidumbre geológica y operacional en planes mineros de corto plazo en faenas a cielo abierto*. Chile.

Marcano, S. (Junio de 2017). *es.Scribd.com*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/95158796/Simulacion-de-Sistemas-Continuos>

Mejía, D. (2009). *Simulación de transporte y cargue en una mina subterránea*.

Mena, R.; Zio, E.; Kristjanpoller, F.; Arata, A. (2013). Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. *International Journal of Mining Science and Technology*, 113-119.

Moradi, A., Tabesh, M., & Askari, H. (2019). A multiple objective transportation problem approach to dynamic truck dispatching in surface mines. *European Journal of Operational Research*, 331-342.

Natividad, J. (2014). *Pronóstico del rendimiento de equipos de carguío y acarreo utilizando información del dispatch en antamina*. Lima, Perú.

- Nehring, M. (2018). A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems. *International Journal of Mining Science and Technology*, 205-214.
- Newman, A., Rubio, E., Caro, R., Weintraub, A., & Eureka, K. (2010). A Review of Operations Research in Mine Planning. *Ingeniería Chile*, 225-245.
- Olazábal, J. (2015). *Factibilidad del cambio de sistema de control de mina en la unidad minera de Toquepala*. Lima: Universidad Católica del Perú.
- Olivares, C. (2011). *Mejoramiento de prácticas operacionales mediante el uso de modelos de gestión*. Santiago de Chile.
- Orosco, W. (2015). *Gestión de mejora del sistema de minado, mina Lagunas norte*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Osarenmwinda, J. (2013). Critical components that cause failure and downtime in electrical machine of a power generating plant: a case study. *International Journal of Academic Research*, 119-124.
- Overmeyer, L., Dreyer, J., & Altmann, D. (2010). Data mining based configuration of cyclically interlinked production systems. *Cirp Annals-manufacturing Technology*.
- Ozdemir, B., & Kumral, M. (2019). *Simulation based optimization of truckshovel material handling systems in multipit surface mine*. Quebec: University Street.
- Parragh, S., & Cordeau, J.-F. (2017). Branch-and-price and adaptive large neighborhood search for the truck and trailer routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 28-44.
- Quiquia, G. W. (2015). *Mejoramiento Continuo en la gestión del Ciclo de Acarreo de Camiones en minería a tajo abierto en Antamina, Cerro verde, Toquepala, Cuajone, Yanacocha, Alto Chicama, Las Bambas, Cerro Corona, Antapacay Y Pucamarca*. LIMA PERU.
- Rajagopal, P. (2014). *Minimizing Material Processing Time and Idle Time of a Critical Machine in a Flow Shop*. Advanced Materials Research.
- Ramos, A. (2010). *Modelos matematicos de Optimización*. Comillas Madrid.
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Sepulveda, G. (2012). Planeamiento de minas a cielo abierto mediante optimización estocástica. *Boletín de Ciencias de la Tierra*.

- Seyyedhasani, H., Dvorak, J. S., & IAgRE. (2018). Reducing field work time using fleet routing optimization. *Elsevier Ltd*.
- Torkamani, E. (2013). *Linkage of Truck-and-shovel operations to short-term mine plans using discrete event simulation*. University of Alberta.: Master of Science Thesis. Department of Civil & Environmental Engineering.
- Tovar, A., & Mota, A. (2007). *Un modelo de administración por procesos*. Mexico: Panorama.
- Turri, V. (2014). Fuel-efficient heavy-duty vehicle platooning by look-ahead control. . *IEEE*.
- Upadhyay, S. (2016). Truck-shovel allocation optimisation: a goal programming approach. *Mining Technology*.
- Van De Hoef, S., Johansson, K., & Dimarogonas, D. (2015). Coordinating truck platooning by clustering pairwise fuel-optimal plans. *IEEE 18th international conference on intelligent transportation systems*, 408-415.
- Ventura, R. (2010). *Educational Data Mining: A Review of the State of the Art*. IEEE Transactions Systems.
- Vinué, P. (2006). *Optimización de productos y procesos industriales*. Barcelona: Gestión 2000.
- Woollam, C. (1989). Flowshop with no idle machine time allowed.
- Wout Dullaert, G. K. (2002). New heuristics for the fleet size and Mix Vehicle Routing Problem with Windows. *Journal of the Operational Research Society*.
- Yang, W. (2018). Implementation of velocity Optimisation strategy based on preview road information to trade off transport time and fuel consumption for hybrid mining trucks. *IET Intelligent Transport Systems*.
- Zhang, L. (2015). An Integer Programming Approach for Truck-Shovel Dispatching Problem in Open-Pit Mines. *Elsevier*.
- Zhou, H. Z. (2014). Single Machine Predictive Scheduling Using Inserted Idle Times. *Journal of Applied Mathematics* . .