

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **INGENIERÍA DE MINAS**

“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PROGRAMACIÓN LINEAL EN EL DESPACHO DE COMBUSTIBLE PARA REDUCIR COSTOS EN EL TRANSPORTE EN UNA MINA A TAJO ABIERTO, AREQUIPA, 2021”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Edi Bardales Mendoza

Jeff Hendry Hassler Carranza Lozano

Asesor:

Mg. Daniel Alejandro Alva Huamán

<https://orcid.org/0000-0002-1053-9347>

Cajamarca - Perú

2024

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	ELMER OVIDIO LUQUE LUQUE
	Nombre y Apellidos

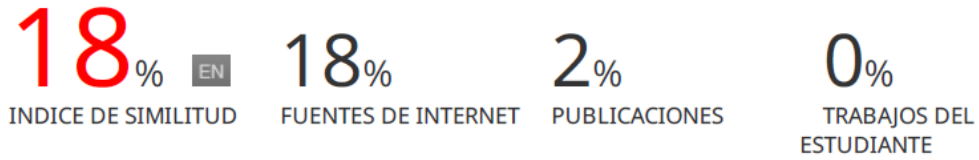
Jurado 2	MIGUEL RICARDO PORTILLA CASTAÑEDA
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	DANIEL ALEJANDRO ALVA HUAMAN
	Nombre y Apellidos

INFORME DE SIMILITUD

TESIS_EDIBARDALESMENDOZA_JEFFCARRANZALUZANO.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repository.up.ac.za Fuente de Internet	17%
2	c.coek.info Fuente de Internet	1%
3	www-dweb-cors.dev.archive.org Fuente de Internet	<1%

Excluir citas Apagado
Excluir bibliografía Apagado

Exclude assignment template Activo
Excluir coincidencias Apagado

DEDICATORIA

El presente trabajo va dedicado a mi familia, que siempre me brindan su apoyo de manera incondicional, a mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, muchos de mis logros se los debo a ustedes y a mis hermanas, son ustedes muestra de que constancia todo se puede, los amo.

También dedico estas líneas en gratitud a los ingenieros por sus enseñanzas y experiencias compartidas, a ustedes nos debemos.

Edi Bardales Mendoza

Dedicado a mi familia, quienes han sido mi motivación para poder llegar a lo que significa esta etapa de mi vida, agradecerles por ser los principales pilares que me ayudaron a fortalecerme como persona y como estudiante. Así mismo, a mis compañeros y docentes que fueron parte de mi formación a lo largo de estos años.

Jeff Hendry Hassler Carranza Lozano

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, queremos agradecer a Dios por permitirnos desarrollar este trabajo y ser nuestra fortaleza en los momentos de dificultades, así como brindarnos la grandiosa oportunidad de ser parte de la Universidad Privada del Norte. A nuestros padres, que son ejemplos de perseverancia, humildad y esfuerzo, gracias por sus consejos y sacrificios abnegados, por haber fomentado en nosotros el deseo de superación y de triunfo en la vida, les estaremos eternamente agradecidos. Finalmente, a nuestros docentes y asesores por acompañarnos en este camino que de no ser por ellos también habría sido difícil de llegar.

Tabla de contenido

Jurado calificador	2
Informe de similitud	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimiento.....	5
Tabla de contenido	6
Índice de tablas	7
Índice de figuras	8
Resumen	9
Capítulo I: Introducción	10
Capítulo II: Metodología	17
Capítulo III: Resultados	202
Capítulo IV: Discusión y Conclusiones	21
Referencias	
¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
Anexos	31

Índice de tablas

Tabla 1: Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	16
Tabla 2: Instrumentos de recolección y análisis de datos.....	17
Tabla 3: Indicadores de rendimiento de camiones- Programación lineal entera mixta (Despacho de flotas heterogéneas de camiones y palas)	21
Tabla 4: Indicadores de los viajes de la flota de camiones.....	22
Tabla 5: Número óptimo de viajes de camiones- Programación lineal entera mixta.....	23
Tabla 6: Indicadores de rendimiento de palas- Programación lineal entera mixta (Despacho de flotas heterogéneas de camiones y palas)	24
Tabla 7: Indicadores de rendimiento de camiones, mejor asignación de flota A (Despacho de flotas heterogéneas de camiones y palas.....	25
Tabla 8: Indicadores de rendimiento de palas, mejor asignación de flota A (Despacho de flotas heterogéneas de camiones y palas)	25

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo (Modelo matemático)	18
Figura 2: Esquema de asignación de pala	20

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue integrar la programación lineal en la gestión del despacho de combustible para minimizar los gastos de transporte en una mina a cielo abierto en Arequipa. Se ha observado un aumento significativo en los costos operativos, particularmente en el transporte. Se diseñó un sistema de gestión eficaz utilizando programación lineal mixta para reducir el consumo de combustible en los equipos de acarreo y carguío. Además, en el modelo desarrollado se incorporó las especificidades de cada equipo utilizado en el transporte, donde se calculó la cantidad óptima de viajes para cada camión en cada ruta durante un turno. Obteniendo como resultado una disminución del consumo de combustible por tonelada transportada en camiones en un 3.46%, en palas en un 3.80%, y en ambos en un 3.58%. En total, se logró un ahorro del 3.61% en combustible.

PALABRAS CLAVES: Sistema, programación, combustible, transporte, costos.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El sector minero es, en principio, un negocio de costos, donde el producto final se controla con los precios que dicta el mercado (basados en la oferta y la demanda mundial). Sin embargo, las empresas tienen influencia sobre los costos directos de sus operaciones, como la perforación, extracción, transporte y tratamiento del mineral. La gestión eficiente de estos costos determina el margen de beneficio obtenido. Por ello, es crucial que las compañías mineras se centren en optimizar sus costos, especialmente durante períodos de baja en los precios de los metales. (Quiroz, 2019). Así mismo, el mayor causante del costo de transporte en las labores mineras a cielo abierto se debe al consumo de energía de los camiones de transporte y palas. La energía está constituida esencialmente por el combustible diésel. La mayor parte de esta energía se puede ahorrar mediante la mejora de la tecnología de los equipos y el rendimiento energético de los transportes de material.

Los antecedentes que se tomaron en cuenta en este trabajo de investigación, se detallan a continuación, a nivel internacional (González, 2016), en su tesis “Optimización de las horas operativas de los CAEX en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible, mediante la utilización de modelamientos compuestos y redes neuronales lineales” a la Universidad de Chile, en el cual explico que el suministro de combustible es una tarea obligatoria para las unidades de extracción, lo que implica detener el equipo durante un período prolongado. Agregar tiempos de inactividad debido a la presencia de otro equipo en la estación y la incapacidad de recargar combustible de inmediato resulta en pérdidas significativas en la eficiencia de los CAEX y en el tonelaje transportado. En resumen, en un escenario donde circulan 60 CAEX y hay dos proveedores de combustible, se observó una reducción aproximada del 65% en el tiempo de espera de

cada camión para reabastecerse. Adicionalmente, disminuye el número de recargas necesarias en periodos mayores a una semana, gracias a rellenar más litros por visita. Lo anterior, significó un incremento de un 3,2% en la utilización de los camiones de extracción. Para asegurar la fidelidad de los resultados presentados anteriormente, se realizó un test de confianza al 95%, para descartar que los beneficios fueron aleatorios. Por último, con estos desarrollos una faena puede recuperarse de manera rápida, gracias a algoritmos de predicción y optimización, y a un bajo costo de implementación y operación, tiempos perdidos en sus activos, con lo que se generará mayores ingresos para el negocio. Así mismo, (Bórquez, 2017) en su tesis “Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO₂ de camiones mineros, mediante simulación discreta”, el objetivo principal fue desarrollar un modelo de simulación para el cálculo del consumo de combustible y la cuantificación de la emisión de CO₂ asociados a los camiones mineros, para alcanzar lo anterior se utilizó la metodología que describe 7 actividades para el logro de un estudio de simulación exitoso. Concluyendo que, calcular el consumo de combustible y emisiones de CO₂ a partir de las ecuaciones que caracterizan el movimiento del camión, permitió modelar el comportamiento de los camiones ante las interacciones con los demás equipos, proponiendo estándares modificables para cuantificar lo que significa tener ese tipo de eventos al desplazarse por la ruta, teniendo una mirada sistémica de cómo afectan las variables controladas por el camión y aquellas variables que no dependen de ellos, si no, dependen de la naturaleza de las operaciones mineras.

A nivel nacional, (Obregon, 2016), en su tesis “Optimización del blending con aplicaciones de programación lineal para el incremento del valor económico del mineral en la unidad minera Catalina Huanca S.A.C.”, señala que es importante tener en cuenta que después de la identificación geo metalúrgica de los diferentes tajos de producción, se tenga procedimientos para realizar un correcto blending, que asegure los máximos rendimientos

en Planta Concentradora e incremente el valor económico de concentrados de mineral a través del empleo de programación lineal (Solver). También se debe tener en cuenta que los aspectos claves en un proyecto minero, son la evaluación del potencial de valor económico de concentrados de mineral y el desarrollo de un diseño de operación eficiente. Los aspectos de diseño incluyen en la metodología de minado, metodología de tratamiento del mineral y en establecer los volúmenes de producción. Todas estas características tienen a su vez gran influencia en la economía del proyecto y en la determinación de su valor integral.

A nivel local (Campos & Ricra, 2018), en su trabajo de investigación titulado "Impacto de la programación lineal con el uso de Solver en la optimización de las operaciones de carguío-acarreo de mineral en la mina Lagunas Norte, La Libertad, 2017", resaltan que el proceso de carguío y transporte son elementos clave que definen la actividad principal en una operación minera. Estas actividades son responsables de mover el material mineral o estéril después de su fragmentación mediante voladuras. Son los procesos más influyentes en los costos de operación de una mina, representando entre el 45% y el 65% de estos costos. Por lo tanto, es crucial asegurar un entorno operativo óptimo para obtener el mejor rendimiento de los equipos y del personal involucrado. La optimización de estos procesos críticos se puede lograr mediante el uso de técnicas de Programación Lineal. Aunque no es una herramienta nueva, se ha demostrado su eficacia en diversas áreas de producción. El avance tecnológico, especialmente en capacidad informática, proporciona un entorno propicio para su aplicación en la industria minera. Para esto, se utilizará la hoja de cálculo Excel® y su complemento Solver. Mirando hacia el futuro, se reconoce que la innovación y la optimización pueden no solo reducir la intensidad del capital, sino también la intensidad energética y de mano de obra, al tiempo que aumentan la actividad minera de manera sostenible.

Por otro lado, en la unidad minera en estudio se viene evidenciando un incremento considerable en los costos, siendo las operaciones de transporte en las que se observa el mayor aumento, esto sucede principalmente a causa del consumo de combustible que no solo se ha visto afectado por la coyuntura actual sino, que ha falta de un control en el despacho del mismo a los equipos de transporte se emplea de manera inadecuada. Según lo señalado anteriormente se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es la reducción de costos en el transporte con la implementación del sistema de programación lineal en el despacho de combustible en una mina a tajo abierto de Arequipa en el año 2021? siendo el objetivo principal determinar la reducción de costos en el transporte al implementar el sistema de programación lineal en el despacho de combustible en una mina a tajo abierto ubicada en Arequipa en el año 2021. Para lo cual se plantea la siguiente hipótesis: Con la implementación del sistema de programación lineal en el despacho de combustible se logrará reducir en promedio un 5% del consumo de combustible reduciendo de esta manera los costos de la operación en los equipos de transporte.

Las bases teóricas empleadas, están relacionadas con las definiciones generales de factores que se tomarán en el desarrollo de la investigación. Los camiones de volteo se utilizan normalmente para el transporte de mineral en las minas a cielo abierto, durante cada turno, camiones vacíos ubicados en los puntos de descarga se asignan a las palas y los que fueron cargados por palas vuelven de nuevo a puntos de descarga para completar sus ciclos. Las palas consumen combustible durante su funcionamiento y en periodos de ralentí y los volquetes consumen combustible durante su espera, carga, descarga y períodos que viajan. El consumo de combustible de cada equipo (camión y pala) depende de su tamaño, tipo, tiempo de funcionamiento, condiciones de funcionamiento y las especificaciones técnicas (INACAP, 2020). La programación lineal es un enfoque matemático que se emplea para resolver problemas de optimización en los cuales la función objetivo y las restricciones son

expresadas de manera lineal. Aunque este método tiene una aplicabilidad amplia en diversos contextos, su desarrollo y utilización se ha centrado principalmente en decisiones asociadas con la producción (Salvatore y Brooker, 2015). Para emplear la programación lineal en operaciones particulares, es esencial crear un modelo matemático. El concepto de "formulación" implica la transformación de descripciones verbales y datos numéricos en expresiones matemáticas que reflejan las interacciones entre las variables de decisión, la función objetivo y las limitaciones (Lawrence, 2017).

La justificación práctica de la presente investigación se sustenta en contribuir con la ampliación de información existente sobre la importancia de aplicar los métodos de programación lineal en el despacho de combustible, ya que nos permite controlar la distribución del mismo en los equipos de transporte en mina, los cuales abarcan un 60% del costo total en operaciones (Quiroz, 2019), por tanto, es necesario distribuir el combustible de manera óptima reduciendo costos en la operación.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

El enfoque de la investigación es cuantitativo ya que se trabajará con fórmulas propuestas para la programación lineal, determinado la fuerza de asociación entre con la variable sistema de despacho de combustible, empleando datos numéricos y porcentuales en el análisis de resultados. Se clasifica como aplicada ya que, se busca reducir los costos en el transporte. Es investigación de tipo Aplicada requiere obligatoriamente de un marco teórico, Stanovich afirmó (2007) que, este tipo de investigación busca predecir el comportamiento específico.

Según el proceso de recolección de datos, el trabajo de investigación es retrospectivo, ya que se empleará los registros de Dispatch para extraer los datos de los ciclos de los equipos de transporte mina. Es longitudinal ya que se realizó las mediciones de datos durante el 2 semestre del año 2021 en el departamento de Arequipa. Corresponde a una investigación Experimental con diseño cuasi experimental ya que se realizará manipulación de una de las variables para medir su relación directa con la variable dependiente (despacho de combustible).

La población asumida por el trabajo de investigación es la flota de carguío y acarreo constituida por 20 camiones CAT y 5 Palas CAT de la unidad minera Cerro Lindo ubicada en Arequipa. La muestra asumida está constituida por 10 camiones Cat y 3 palas Cat, para la selección de la muestra se empleó el muestreo aleatorio simple, a partir de la base de datos de dispatch.

Tabla 1*Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

Objetivo Especifico	Indicador	Técnica	Instrumento	Fuente bibliográfica de la técnica
Determinar la cantidad de combustible consumido por los camiones y palas en una jornada de trabajo en mina.	L/j	Análisis	Tablas y gráficos, guías técnicas	Propia
Determinar el tiempo de ciclo de transporte de Palas y camiones.	h			
Optimizar el ciclo de carguío y acarreo mediante programación lineal entera.	PL	Aplicación		Optimización matemática aplicada. Enunciados, ejercicios y aplicaciones del mundo real con MATLAB, Cánovas (2012)
-Minimizar el uso de combustible mediante un óptimo sistema de despacho.	L/h	de software	Matlab	

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento abarcó 3 etapas, la primera “Gabinete”, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva referente a la investigación. Luego de tener un alcance del tema, se procedió a la elección los vehículos usados en minería para las mediciones necesarias y se simuló un escenario de mina común con todas las características que a esta compete; y se determinaron todas las etapas que se llevaron a cabo en esta investigación, es decir se planteó toda la realización de la tesis.

Tabla 2*Instrumentos de recolección y análisis de datos*

Objetivo Especifico	Indicador	Técnica	Instrumento	Fuente bibliográfica de la técnica
Determinar la cantidad de combustible consumido por los camiones y palas en una jornada de trabajo en mina.	L/j	Analisis	Tablas y gráficos, guías técnicas	Propia
Determinar el tiempo de ciclo de transporte de Palas y camiones.	h			
Optimizar el ciclo de carguío y acarreo mediante programación lineal entera.	PL	Aplicación de software	Matlab	Optimización matemática aplicada. Enunciados, ejercicios y aplicaciones del mundo real con MATLAB, Cánovas (2012)

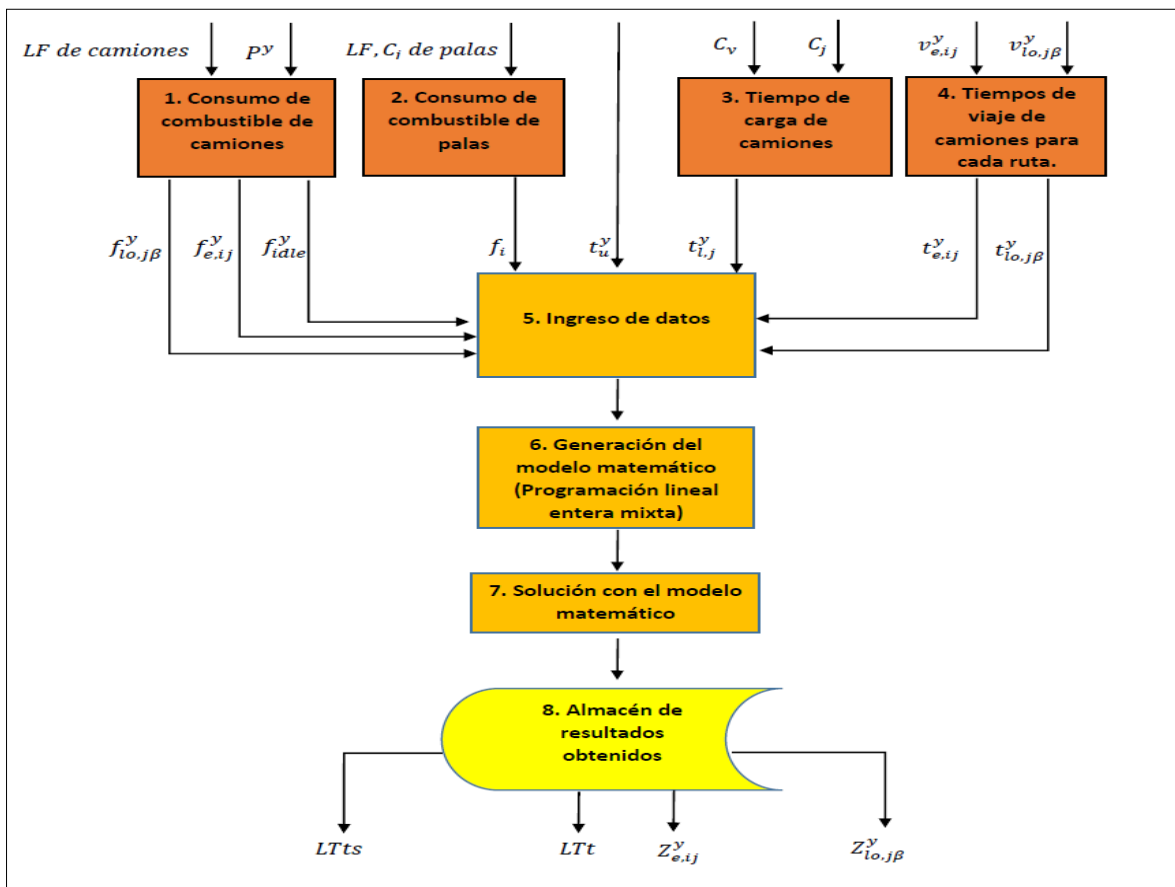
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la tercera etapa “Gabinete”, se procesó la información obtenida en el análisis de datos y campo. Según los datos, se procedió a la elección de un modelo matemático adecuado para el diseño de un sistema de despacho eficiente para así reducir el consumo de combustible en camiones y palas, principal problema en esta investigación. Generado el modelo matemático (programación lineal entera), dio inicio a la solución del problema principal, dando como resultados eventos esperados al momento de plantear la realización de esta investigación. En este último apartado también se describirán los pasos computacionales que se siguieron para resolver el modelo matemático propuesto para así poder llegar a la minimización del uso de combustible en camiones y palas usados en minas

a cielo abierto, se consideran tres problemas para la simulación: despacho de una flota heterogénea de camiones y palas, identificación de la mejor asignación de pala, identificación de la mejor flota. Los datos y pasos utilizados como parámetros de entrada del modelo matemático (programación lineal entera mixta), se resumen en el diagrama de flujo de la siguiente figura.

Figura 1

Diagrama de flujo (Modelo matemático)



Fuente: Elaboración propia.

Uno de los objetivos fue determinar el número óptimo de viajes que cada camión realice en las operaciones de transporte en cada trayecto de la mina para que el combustible consumido por palas y camiones se minimice y se cumplan todas las demandas de manejo. El primer paso en el procedimiento computacional consistió en la estimación del consumo de combustible de los camiones de carga a partir de sus datos operativos o especificaciones

de diseño. Este paso es seguido por la determinación del tiempo de carga de los camiones en función de las capacidades de las palas. Luego se estimó el tiempo de viaje de los camiones en cada ruta y el consumo de combustible de las palas. El tiempo de carga estimado, el tiempo de viaje y el consumo de combustible de los camiones, el consumo de combustible de las palas, el número de los puntos de descarga y el tamaño de la flota de camiones y palas se guardan en una base de datos dedicada y se utilizan como datos de entrada del modelo presentado (Programación lineal entera mixta). Después de eso, el modelo matemático se resuelve utilizando el algoritmo "Intlinprog" en Matlab para determinar los viajes óptimos de cada camión. Este algoritmo resuelve problemas de la siguiente forma:

$$m_x f^T x$$

Sujeto a:

$$\left\{ \begin{array}{ll} x, & \text{son enteros} \\ Ax \leq b, & \text{inecuacion lineal} \\ Aeq_x = beq_x, & \text{ecuacion lineal} \\ lb \leq x \leq ub, & \text{limites inferiores y superiores} \end{array} \right.$$

Para evaluar el rendimiento energético del modelo (Programación lineal entera mixta), el combustible consumido por tonelada movida y el consumo de combustible por turno para camiones y tanto palas como palas obtenidas con la programación lineal entera mixta se comparan con los obtenidos con el método de envío fijo. El porcentaje de mejora de los litros por tonelada para camiones mineros de capacidad mixta, palas y para camiones y palas se calculará mediante las ecuaciones:

Ecuación 1: *Litros por tonelada movida por un camión (mejorado)*

$$LTt_{mejorado} = \frac{LTt_{despacho\ fijo} - LTt_{modelo\ matematico}}{LTt_{despacho\ fijo}} \times 100\%$$

El ahorro total de combustible se estimó mediante la siguiente ecuación:

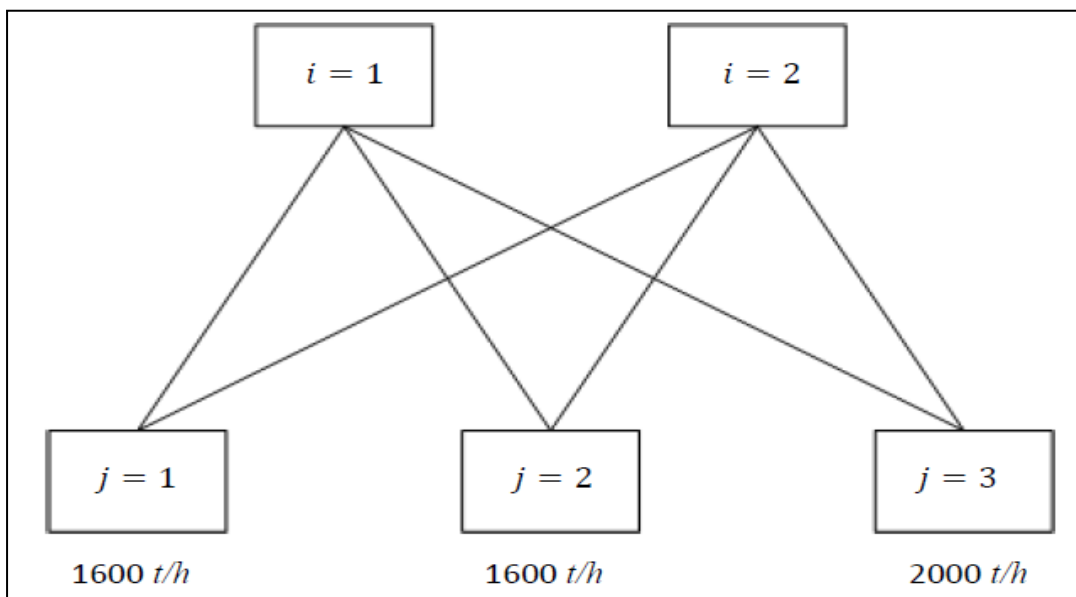
Ecuación 2: Ahorro total de combustible

$$\text{Ahorro de combustible} = \frac{F_{\text{despacho fijo}} - F_{\text{modelo matematico}}}{F_{\text{despacho fijo}}} \times 100\%$$

Análisis del modelo de despacho fijo (tradicional), este modelo se usa en minas existentes y se usará como un modelo de referencia. El método de envío fijo consiste en asignar un camión a una pala específica. Cada camión de acarreo utilizado en las operaciones de transporte está asignado para seguir una ruta particular. Esta asignación permanece sin cambios hasta el final del turno. El número de camiones asignado a cada pala es fijo y no cambia a lo largo del turno.

Figura 2

Esquema de asignación de pala



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

Resultados del objetivo específicos 01

Cantidad de combustible consumido por los camiones y palas en una jornada de trabajo en mina.

Tabla 3

Indicadores de rendimiento de camiones- Programación lineal entera mixta

Índice	Ft^y (L)	LTt^y mL/t	$LTkm^y$ (mL/ tkm)	Tons(t)	d^y km
c1	241.94	59.18	0.27	4088	219
c2	240.24	59.58	0.27	4032	216
c3	236.89	59.58	0.28	3976	213
c4	132.63	65.82	0.7	2015	94
c5	184.5	74.7	0.57	2470	132
c6	87.52	67.32	0.1	1300	66
c7	354.23	76.87	0.43	4608	177
c8	350.83	68.95	0.4	5088	174
c9	344.74	69.06	0.4	4992	171
c10	345.19	67.84	0.4	5088	171
Total	2518.71	668.9	3.82	37657	1633

(Despacho de flotas heterogéneas de camiones y palas)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4*Indicadores de los viajes de la flota de camiones.*

Camión	Viajes								Consumo de combustible			Distancia (km)
	vacío i1-j1	cargado j1-i1	vacío i1-j2	cargado j2-i1	vacío i2-j2	cargado j2-i2	vacío i2-j3	cargado j3-i2	litros	mL/t	mL/tkm	
c1	53	53					20	20	248.05	60.61	0.28	219
c2	64	64					8	8	248.05	59.58	0.28	216
c3	63	63					8	8	236.89	59.58	0.28	213
c4	11	11					19	19	132.63	65.82	0.7	94
c5	16	16			18	18	4	4	174.72	70.73	0.54	132
c6	5	5	6	1		5	9	9	92.09	70.84	1.07	66
c7				17	33	6	15	15	354.23	76.87	0.43	177
c8				10	9	5	38	38	250.83	68.97	0.39	174
c9			6	13	9	2	37	37	344.74	69.06	0.4	171
c10			1	10	11	2	47	41	345.19	67.84	0.4	171

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos con el sistema de despacho eficiente (Programación lineal entera mixta) muestran que para toda la flota (camiones y palas) utilizada en las operaciones de transporte, el indicador de eficiencia energética es $13.47 \frac{mL}{t}$. Se consumen 5070.67 litros de combustible para todas las operaciones de transporte (carga y transporte) durante un turno. Los indicadores de eficiencia energética para camiones y palas son $63.18 \frac{mL}{t}$ y $67.77 \frac{L}{t}$ respectivamente.

Resultados del objetivo específico 02

Número óptimo de viajes que cada camión debe realizar en cada ruta de la mina durante un turno de ciclo de transporte de Palas y camiones.

La cantidad de viajes que cada camión realizó cargado o vacío en cada una de las rutas de la mina, se determinó la cantidad de veces cada camión ha sido cargado por una pala

específica durante un turno y la cantidad de veces que cada camión ha descargado su carga en un punto de descarga específico.

A partir de esta información, el consumo de combustible por turno, el consumo promedio de combustible específico, los litros por tonelada-kilómetro de cada camión y la distancia recorrida por cada camión durante todo el turno fueron estimados. Los resultados obtenidos con el modelo de programación lineal entera mixta se describen a continuación

Tabla 2

Número óptimo de viajes de camiones- Programación lineal entera mixta

Camión N°	Capacida d	Puntos de descarg a	j1		j2		j3	
			Vací o	Cargad o	Vací o	Cargad o	Vací o	Cargad o
c1	56	i1	53	53	0	0	0	0
		i2	0	0	0	0	20	20
c2	56	i1	64	64	0	0	0	0
		i2	0	0	0	0	8	8
c3	56	i1	63	63	0	0	0	0
		i2	0	0	0	0	8	8
c4	65	i1	11	11	1	0	0	0
		i2	0	0	0	1	19	19
c5	65	i1	16	16	0	0	0	0
		i2	0	0	18	18	4	4
c6	65	i1	5	5	6	1	0	0
		i2	0	0	0	5	9	9
c7	96	i1	0	0	0	27	0	0
		i2	0	0	33	6	15	15
c8	96	i1	0	0	9	10	0	0
		i2	0	0	6	5	38	38
c9	96	i1	0	0	6	13	0	0
		i2	0	0	9	2	37	37
c10	96	i1	0	0	1	10	0	0
		i2	0	0	11	2	41	41

Fuente: Elaboración propia

Resultados del objetivo específico 03

Optimización de la cantidad de viajes realizados por los camiones en el ciclo de carguío y acarreo mediante programación lineal entera mixta.

Tabla 3

Indicadores de rendimiento de palas- Programación lineal entera mixta (Despacho de flotas heterogéneas de camiones y palas)

Indices	Fs_j (L)	LTs_j (mL/t)	Toneladas (t)	%
P1 (1600 t/h)	870.53	71.59	12160	32.29
P2 (1600 t/h)	662.76	75.1	8825	23.44
P3 (2000 t/h)	1018.67	61.1	16672	44.27
Total	2551.96	207.79	37657	100

Fuente: Elaboración propia.

Para las flotas A con palas de 1600 t/h de capacidad, los camiones y palas consumían 5427.67 litros de combustible. La eficiencia energética alcanzada por esta flota fue de 144.23 litros por tonelada movida para toda la operación de transporte. Los camiones y palas han consumido 2712.41 y 2715.26 litros de combustible respectivamente. Se encontró que el indicador de energía para camiones solo era 72.08 mL/t y para palas 72.15 mL/t. La distancia total recorrida por camiones vacíos durante todo el turno fue de 651 km. La misma distancia fue recorrida por camiones después de ser cargada.

Tabla 4

Indicadores de rendimiento de camiones, mejor asignación de flota A (Despacho de flotas heterogéneas de camiones y palas)

Índice	Ft_y (L)	LTt_y (mL/t)	Toneladas (t)	d_e^y (km)	d_{lo}^y (km)
c1	127.48	82.99	1536	32	32
c2	333.99	66.91	4992	78	78
c3	333.99	66.901	4992	78	78
c4	358.53	82.99	4320	90	90
c5	333.99	66.91	4992	78	78
c6	333.99	66.91	4992	78	78
c7	46.51	69.2	672	11	11
c8	333.99	66.91	4992	78	78
c9	151.38	82.99	1824	38	38
c10	358.53	82.99	4320	90	90
Total	2712.38	735.701	37632	651	651

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5

Indicadores de rendimiento de palas, mejor asignación de flota A (Despacho de flotas heterogéneas de camiones y palas)

Índice	Fs_j (L)	LTS_j (mL/t)	Toneladas (t)	%
j1 = 1600	933.79	73.14	12768	33.93
j1 = 1600	887.42	73.36	12096	32.14
j1 = 1600	894.05	70.02	12768	33.93
Total	2715.26	216.52	37632	100

Fuente: Elaboración propia

Para la segunda flota B con palas de 2000 t/h de capacidad, se consumieron 4833.86 litros de combustible en la operación de transporte. La eficiencia energética de esta flota fue de 128.45 mL/t movida para toda la operación de transporte. Los camiones y palas consumieron 2480.24 y 2353.62 litros de combustible respectivamente. El indicador de energía de los camiones solo fue de 65.90 ml/t y el de las palas 62.54 ml/t. La distancia total recorrida en camiones vacíos fue de 618 km. La misma distancia fue recorrida por

camiones después de ser cargada. La Tabla 41, Tabla 42, Tabla 43 y la Tabla 44 resumen los resultados obtenidos con esta flota.

La última flota C lleva a 139.76 litros por tonelada y 5259.45 litros de combustible consumidos para todo el transporte. Camiones y palas han consumido 2378.45 y 2881 litros de combustible. La eficiencia energética de los camiones solos fue de 63.2 *mL/t* y la de las palas 74 *mL/t*. La distancia total recorrida en camiones vacíos fue de 618 km. La misma distancia fue recorrida por camiones después de ser cargada. Las Tablas 45, 46, 47 y 48 resumen los resultados obtenidos con esta flota

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El consumo de combustible de los camiones se reduce con el modelo propuesto, llegando a consumirse 89.68 litros menos y el *LTt* se mejora en un 3.46%. Con el modelo de despacho eficiente propuesto, los camiones se despachan utilizando la estrategia de envío flexible. Esa estrategia da como resultado una mejor optimización de la elección de ruta de camiones vacíos y cargados. El consumo total de combustible de las palas se reduce con el sistema de despacho propuesto, alrededor de 100.42 litros de combustible se consumen menos en las operaciones de carga con el modelo y el *LT* también se mejora en un 3.80%. La explicación de esto es que, la pala P3 que tiene la mayor capacidad se utiliza más con el Sistema de despacho eficiente (programación lineal entera mixta) que con el modelo de despacho fijo (tradicional). Con respecto a la mejor asignación de palas, una comparación de los resultados obtenidos con las tres posibles asignaciones de palas queda claro que la segunda asignación es menos eficiente que las otras dos. De hecho, al asignar la pala con la mayor capacidad en el segundo punto de carga y para la misma cantidad de material transportado, se consumen aproximadamente 141.99 litros y 73.51 litros de combustible en las operaciones de transporte con esta asignación en comparación con las asignaciones A y C respectivamente. La explicación de esta observación es que, con la asignación B, la distancia total de viaje de los camiones cargados es de 651.5 km, mientras que para las otras dos asignaciones es de 634.5 km. Por lo tanto, los camiones consumen más combustible con la asignación B. La pala de capacidad 2000 *t/h* se utiliza menos con la asignación B con respecto a las otras dos asignaciones. De hecho, con la asignación B, solo el 32.14% de los materiales movidos en el transporte se cargan en los camiones con esta pala; mientras que, para las otras dos asignaciones, el 42.35% de los materiales se cargan en los camiones por

la pala con una capacidad de 2000 t/h . Sin embargo, esta pala es la más eficiente en cuanto al consumo de combustible por tonelada durante el tiempo de trabajo.

Estos resultados permiten realizar una comparación con lo señalado por Gonzales (2016), en su tesis “Optimización de las horas operativas de los CAEX en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible, mediante la utilización de modelamientos compuestos y redes neuronales lineales” a la Universidad de Chile, en el cual explico que el abastecimiento de combustible es un proceso obligado por parte de las unidades de extracción, el cual conlleva detener el equipo por un tiempo prolongado. Sumar tiempos muertos a causa de que haya otro equipo en la estación y no poder recargar petróleo de manera inmediata, implica pérdidas importantes en la utilización de los CAEX y de tonelaje transportado. Concluyendo que, en un escenario de 60 CAEX en circulación y con dos petroleras, se generó una reducción de un 65% aproximadamente en la espera de cada camión para reabastecer.

Con respecto a la identificación de la mejor flota se realiza una comparación del rendimiento energético de las tres flotas, se observa que la flota A con palas con una capacidad de 1600 t/h es la más ineficiente. Pero en términos de eficiencia y productividad en general, la flota A es la mejor. La flota B con palas de una capacidad de 2000 t/h es la flota más eficiente. En efecto, 93.81 litros del combustible se ahorran con la flota B con respecto a la flota A. Los $LTts$ y los LTt disminuyeron respectivamente un 13.25% y un 8.55% con esta flota en comparación con la flota A. Los resultados obtenidos con la flota B en comparación con los obtenidos con la flota C muestran que un ahorro de 425.59 litros de combustible y una disminución del 7.83% de los litros por tonelada se realizan con la flota B. Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos, podemos afirmar que la mejor flota de acarreo y carga con respecto a la productividad no es necesariamente la mejor flota con respecto al consumo de combustible. Estos resultados permiten comparar los hallazgos de Campos (2017), en su Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero de Minas: “Impacto de la programación lineal con el uso de Solver en la optimización de las operaciones de carguío-acarreo de mineral en la mina Lagunas Norte, La Libertad, 2017”, señala que el carguío y el transporte son las actividades

principales que definen la operación principal en una mina. Estas tareas son responsables de movilizar el material mineral o estéril que ha sido fragmentado mediante voladuras. Dichos procesos son los más determinantes en los costos de operación de la mina, representando entre el 45% y el 65% de los costos totales. Por lo tanto, es crucial asegurar un entorno operativo adecuado para lograr el máximo rendimiento de los equipos involucrados, tanto en términos de su aspecto físico (material, equipos, mantenimiento, disponibilidad, suministros, etc.) como en el aspecto humano (operadores, personal de mantenimiento, supervisores, etc.). Mediante la aplicación de técnicas de Programación Lineal, podemos crear una estrategia para optimizar estos procesos críticos. Aunque la Programación Lineal no es una herramienta nueva, sus efectos beneficiosos en una amplia gama de procesos de producción están bien documentados. La capacidad de procesamiento de computadoras y los avances tecnológicos rápidos ofrecen un entorno propicio para su implementación y gestión en entornos de producción minera. Para este propósito, emplearemos la hoja de cálculo Excel® (Microsoft Corporation).

Conclusiones

En este estudio, se desarrolla un sistema de despacho eficiente mediante programación lineal mixta para la minimización de combustible de camiones y palas en minas a cielo abierto. Las especificaciones de diseño de cada equipo utilizado en las operaciones de transporte se consideran directamente en la formulación del modelo propuesto.

El modelo determinó el número óptimo de viajes que cada camión debió realizar en cada ruta de la mina durante un turno. Se consideró un estudio de caso de una mina con camiones de carga con dos puntos de descarga, una flota mixta de camiones y palas.

Los resultados de simulación obtenidos con el sistema de despacho eficiente (programación lineal entera mixta) en comparación con un despacho fijo (tradicional) muestran que con el modelo propuesto disminuyó los litros por tonelada de consumo de combustible de los camiones en un 3.46%, y las palas en 3.80 % y el de ambos camiones y palas en un 3.58%. En general, se logra un ahorro de combustible del 3.61%. En el caso de una flota heterogénea de palas, se ha demostrado que el modelo propuesto puede ayudar a los empresarios en la toma de decisiones a identificar la mejor asignación de cada pala.

REFERENCIAS

- Bórquez, D. (2017). “Cálculo del consumo de combustible y emisiones de co2 de camiones mineros, mediante simulación discreta”. Revista de Ingeniería Industrial.
- Campos, M., & Ricra, R. (2018). *Impacto de la programación lineal con el uso de SOLVER en la optimización de las operaciones de carguío-acarreo de mineral en la mina Lagunas Norte, La Libertad, 2017*. Universidad Privada del Norte.
- González, R. (2016). “Optimización de las horas operativas de los CAEX en los procesos de descarga en chancado y abastecimiento de combustible, mediante la utilización de modelamientos compuestos y redes neuronales lineales”. Universidad de Chile.
- Obregon, C. (2016). “Optimización del blending con aplicaciones de programación lineal para el incremento del valor económico del mineral en la unidad minera Catalina Huanca S.A.C.”. Arequipa, Perú: Universidad Nacional de San Agustín.
- Sáez Muñoz, N. E. (2014). *Simulación on-line para el despacho de camiones mineros en operaciones a cielo abierto*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Urrutia Goldsack, D. I. (2017). *Optimización en la asignación de estacionamientos de los camiones de extracción para el cambio de turno mediante la utilización de redes neuronales y árboles de decisión*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

Anexos

Anexo 1

Matriz de consistencia

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES DE INDICADORES	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
<p>Problema general</p> <p>¿Cuál es la implementación del sistema de programación lineal en el despacho de combustible para reducir costos en el transporte en una mina superficial de Arequipa en el año 2021?</p> <p>Problemas Específicos:</p> <p>¿Cuál la cantidad de combustible consumido por los camiones y palas?</p>	<p>Objetivo General:</p> <p>Implementar el sistema de programación lineal en el despacho de combustible para reducir costos en el transporte en una mina superficial ubicada en Arequipa en el año 2021.</p> <p>Objetivos Específicos:</p> <p>Determinar la cantidad de combustible consumido por los camiones y palas en una jornada de trabajo en mina.</p> <p>Determinar el número óptimo de viajes que cada camión debe realizar en cada ruta de la mina durante un turno de ciclo</p>	<p>Hipótesis General:</p> <p>Con la implementación del sistema de programación lineal en el despacho de combustible se logrará reducir en promedio un 5% del consumo de combustible reduciendo de esta manera los costos de la operación en los equipos de transporte.</p> <p>Hipótesis Específicas:</p> <p>Los resultados de simulación obtenidos con el sistema de despacho eficiente (programación lineal entera mixta) en comparación con un despacho fijo (tradicional) mostraran que con el modelo propuesto se disminuirá los litros por tonelada de consumo de combustible de los camiones y palas entre un 3 a 4 % .</p>	<p>Variable Independiente:</p> <p>Sistema de programación lineal.</p> <p>Indicadores:</p> <p>Factores de rodadura.</p> <p>Indicadores de desempeño.</p> <p>Duración de turno.</p> <p>Demanda horaria de manejo.</p> <p>Consumo de combustible (l).</p>	<p>Tipo de Investigación:</p> <p>Aplicada Experimental</p> <p>Diseño de Investigación:</p> <p>Cuasi experimental.</p>	<p>Población:</p> <p>La flota de carguío y acarreo constituida por 20 camiones CAT y 5 Palas CAT.</p> <p>Muestra:</p> <p>10 camiones Cat y 3 palas Cat.</p> <p>Técnicas:</p> <p>Análisis de datos.</p> <p>Procesamiento de resultados.</p> <p>Instrumentos:</p> <p>Tablas y gráficos, guías técnicas.</p>

¿Cuál es el número de viajes de cada camión en la ruta del ciclo de carguío?

de transporte de Palas y camiones.

Optimizar la cantidad de viajes realizados por los camiones en el ciclo de carguío y acarreo mediante programación lineal entera mixta.

El modelo determinará el número óptimo de viajes que cada camión debe realizar en cada ruta de la mina durante un turno, teniendo como ventaja que es aplicable a flotas homogéneas y heterogéneas de camiones y palas.

Mediante la programación lineal entera mixta se optimizará la cantidad de viajes realizados por los camiones en el ciclo de carguío y acarreo.

Variable

Dependiente:

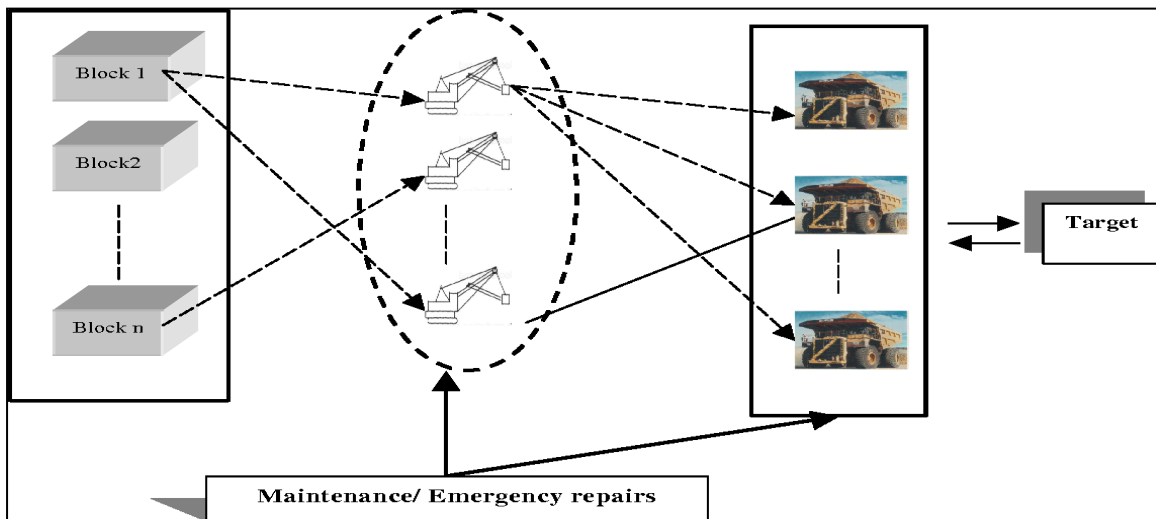
Costos de transporte mina.

Indicadores:

Costo por consumo de combustible (\$/l).

Matlab.

ANEXO N° 02: Sistema de asignación camiones - palas



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO N° 03: Sistema Dispatch

