

Technical-economic analysis of replacing diesel truck fleet with electric trucks in Yura quarries

Fabricio Arias-Quispe¹, Gianfranco Vega-Milón¹, Hilda Huahuachambi-Calsina², Pamela Velarde-Loayza²

¹Students of Mining Engineering from Technological University of Peru, Perú, fa.ariasq@gmail.com,
gianvega.58@gmail.com

²Professors of Mining Engineering from Technological University of Peru, Perú, C16695@utp.edu.pe, pvelarde@utp.edu.pe

Abstract – *Currently, in open-pit mining, transportation by mining trucks is a fundamental part of the mining cycle, since they travel long distances several times a day. The cost of such transportation operation has a high impact on the operating costs of mining exploitation, due to the high prices and massive fuel consumption by diesel trucks. On the other hand, the use of other renewable energy sources in mining equipment is an imperative need, which is why in the present study the replacement of diesel transport equipment with electric equipment was diagnosed, which was determined by applying the Choosing by Advantages (CBA) method. The application of the CBA allows the analysis and decision making to choose the alternative of continuing with diesel trucks or replacing them with electric ones, taking into account factors such as operating costs, productivity and specific criteria such as the technical viability and economic feasibility offered by each equipment. The technical-productive evaluation showed that electric trucks have a better performance (148% more torque) and offer 10% more production compared to diesel equipment. Furthermore, it was economically demonstrated that electric trucks provide an 80% saving in energy consumption and operating costs were reduced by \$292/Hr, providing an optimization of 34.78%. This research shows that electric trucks are economically viable for the mining operation under study and offer better profitability over time than diesel trucks.*

Keywords-- Mining truck, technical-economic analysis, batteries and electric truck.

Análisis técnico-económico de reemplazo de flota de camiones diésel por camiones eléctricos en las canteras de Yura

Fabricio Arias-Quispe¹, Gianfranco Vega-Milón¹, Hilda Huahuachambi-Calsina², Pamela Velarde-Loayza²

¹Students of Mining Engineering from Technological University of Peru, fa.ariasq@gmail.com, gianvega.58@gmail.com

²Professors of Mining Engineering from Technological University of Peru, C16695@utp.edu.pe, pvelarde@utp.edu.pe

Resumen– Actualmente, en la minería a tajo abierto, el transporte mediante camiones mineros es una parte fundamental del ciclo de minado, ya que recorren grandes distancias varias veces al día. El costo de dicha operación de transporte tiene un alto impacto en los costos operativos de explotación minera, debido a los altos precios y el consumo masivo de combustible por parte de los camiones diésel. Por otro lado, el uso de otras fuentes de energías renovables en los equipos mineros es una necesidad imperativa, por lo cual en el presente estudio se diagnosticó el reemplazo de los equipos de transporte a diésel por equipos eléctricos, el cual se determinó con la aplicación del método Choosing by Advantages (CBA). La aplicación del CBA permite el análisis y toma de decisiones para optar por la alternativa de continuar con camiones a diésel o reemplazarlos por eléctricos, teniendo en cuenta factores como costos de operación, productividad y criterios específicos como la viabilidad técnica y la factibilidad económica que ofrece cada equipo. La evaluación técnico-productiva evidenció que los camiones eléctricos presentan un mejor performance (148% más de torque), y ofrecen un 10% más de producción en comparación de los equipos a diésel. Asimismo, económicamente se demostró que los camiones eléctricos brindan un ahorro del 80% en el consumo energético y se redujeron los costos operativos en 292\$/Hr, proporcionando una optimización de 34.78%. Esta investigación muestra que los camiones eléctricos son económicamente viables para la operación minera de estudio y ofrecen una mejor rentabilidad en el tiempo que los camiones diésel.

Keywords-- Mining truck, technical-economic analysis, batteries and electric truck.

I. INTRODUCCIÓN

En la minería a tajo abierto, el proceso de acarreo(transporte de material) es uno de los que genera mayores costos en mina, debido a que los camiones mineros diésel consumen hasta 367 litros de combustible por hora para cumplir con los ciclos de transporte diarios, los cuales tienen como objetivo movilizarse desde la mina(tajo) hasta la planta o depósitos de desmonte(botaderos), asimismo, el costo de combustible se ve afectado directamente por el precio internacional del diésel, el cual es sumamente inestable (logrando alcanzar su precio máximo histórico registrado por el BCRP de 122\$ por barril en el 2022), esta fluctuación del precio del combustible se ve reflejado en el costo operativo y consecuentemente en el costo unitario. Frente a esta situación surge la alternativa de que estos equipos de acarreo minero con motores a combustión interna sean reemplazados por camiones eléctricos(ya sea híbridos o eléctricos puros), los cuales permiten tener un costo energético más bajo y trabajando dentro de las mismas condiciones operativas, frente a esta premisa, surge la siguiente interrogante: ¿Cuál es el análisis técnico-económico del reemplazo de flota de camiones Diésel por camiones eléctricos para el proceso de acarreo en el área de operaciones en las canteras de Yura?

Debido a la inestabilidad de los precios internacionales del combustible Diésel, la cual genera mayor inversión, es que se han desarrollado y probado diversas fuentes de energía renovables alternas aplicadas al transporte minero, tanto para aminorar los costos energéticos de los camiones en gran minería, así como para generar una reducción del impacto ambiental generado por la actividad minera. Es por ello que, esta investigación propone evidenciar la viabilidad de implementar camiones eléctricos mineros a través de una metodología innovadora para el reemplazo de equipos de gran minería. Para ello, se evaluará la eficiencia y costos unitarios de los camiones diésel actuales y la propuesta de reemplazo por camiones eléctricos, y determinar la rentabilidad de la implementación de estos mismos. Se debe añadir que, es conveniente investigar la forma de reducir progresivamente el uso de equipos motorizados a combustión interna, reemplazándolos por camiones eléctricos, ya sean eléctricamente puros o híbridos (eléctricos), estos equipos brindan una gran optimización en el consumo energético y reducen costos improductivos en el transporte, los motores a combustión interna diésel presentan una eficiencia energética de 30% a 45%, mientras que los motores eléctricos logran un aprovechamiento superior al 75% de la energía que consumen, es decir, son más eficientes.

Esta marcada ventaja en los camiones eléctricos en la eficiencia energética se convierte en un ahorro en los costos energéticos, el cual evidencia de manera clara una reducción en los costos operativos del proceso de acarreo, de tal modo que impacta de manera directa en el costo unitario de las canteras de Yura.

El acarreo en mina es un componente determinante en el costo unitario, sin embargo, el costo operativo de los camiones Diésel está sujeto al precio internacional del combustible Diésel, el cual es inevitablemente fluctuante, inestable y que varía de acuerdo con el mercado internacional. Cabe mencionar que, según [1], el consumo anual de combustible para un camión minero de 400 toneladas es de casi 1000000 de Kg. de combustible, lo cual, implica en un costo de millones de dólares anuales en el costo de combustible anual de dicho camión, lo cual se refleja en los costos operativos y costos por tonelada extraída. Asimismo, de acuerdo con [2], los costos de transporte en minería pueden representar de un 50% a un 60% en el costo total de una operación minera, bajo esa premisa, cualquier mejora en la eficiencia del acarreo de mina conlleva a una gran optimización de costos en el tiempo. Así mismo, también estudió los efectos de la electrificación en la minería a cielo abierto, en la productividad de operaciones mineras reales utilizando un simulador de eventos discretos, para determinar las ventajas y desventajas de adoptar una flota eléctrica, el modelo hecho simuló turnos múltiples una flota

mixta de camiones Diésel y eléctricos, estaciones de carga, sistema trolley de recarga y estaciones de reabastecimiento de combustible. Concluyendo que, debemos ser muy cuidadosos al momento de asignar las rutas para los camiones eléctricos para que estratégicamente podamos ubicar las estaciones de carga y los trolley de recarga para evitar que las baterías se descarguen completamente.

Por su parte, [3] realizó un modelo matemático funcional de operación de un camión eléctrico híbrido en Rusia, el cual cuenta con frenado regenerativo (funciona como un péndulo, ya que durante la aceleración el condensador se descargará y durante el frenado se recargará las baterías aprovechando la energía potencial del descenso del camión), y un modelo matemático de optimización para determinar los parámetros energéticos que requiere el almacenamiento de la energía y la potencia requerida, para finalmente realizar una evaluación de la eficacia de la modernización de los camiones mineros con transmisión potencia híbrida; los resultados que obtuvo para 3 volquetes mineros BelAZ 7547 que funcionaron 3 días fue un ahorro de 23% de combustible al realizarse 187 aplicaciones de frenado en una distancia recorrida de 98km, confirmando la eficacia que proporciona la transmisión de potencia híbrida. A su vez, [4] realizó una aplicación real de camiones mineros totalmente eléctricos que cuentan con el sistema de frenado regenerativo, en donde hizo el análisis del consumo energético y su aplicación en varias áreas mineras, bajo las mismas condiciones operativas en las que trabajan los camiones mineros tradicionales (con vías cuesta abajo, cuesta arriba y planas), asimismo, estimó las emisiones de los vehículos mineros tradicionales (a Diésel) en comparación con los camiones mineros eléctricos con el fin de proporcionar referencia para la aplicación de futuras tecnologías con energías renovables; para la parte experimental, se realizaron 10 pruebas en 10 diferentes minas a cielo abierto de China, en donde emplearon un camión totalmente eléctrico modelo YTK90 con capacidad de carga de 60 toneladas, se realizó el registro de la cantidad de combustible que emplearon los camiones a Diésel y también el consumo de energía que realizaron los camiones mineros eléctricos para hacer una comparación de consumo energético para determinar un posible ahorro. Los resultados obtenidos de su investigación fueron que los camiones eléctricos puros proporcionan un ahorro de más del 65% en el consumo de energía por kilómetro gracias al frenado regenerativo propio de los camiones eléctricos, asimismo, el ahorro de consumo energético traducido en ahorro de combustible se convierte en potencial para reducir emisiones contaminantes.

Asimismo, la referencia [5] investiga como el sistema de recuperación de energía (frenado regenerativo) en camiones híbridos afecta el costo total por tonelada extraída, todo esto se hace a través de una simulación y un análisis de costos, usa como referencia los costos de la minería de Australia, toma en consideración costos de propiedad de camiones, costos operativos, costos de mantenimiento y de neumáticos, para finalmente determinar que, lo mejor es que los camiones usen baterías LiFePO₄ de carga rápida y volantes electromecánicos, asimismo utilizando aumento de potencia y de energía la reducción potencial de costos en condiciones ideales fue del 7%. Al mismo tiempo [6], afirman que los vehículos eléctricos híbridos mejoran la economía de combustible al aprovechar el entorno operativo, dando

máxima eficiencia al motor de combustión interna, y empleando un sistema de almacenamiento de energía eficiente como una batería, que pueda recargarse constantemente para poder mejorar la economía de combustible mediante el frenado regenerativo y el funcionamiento con el motor apagado, en este caso se analizó la cuestión económica de combustible respecto a datos como la geometría de la carretera y velocidades a las que va a transitar el camión.

Según la referencia [7], a través de una investigación se recopilan escenarios en los que los camiones eléctricos pueden funcionar sin necesidad de conectarse a la red eléctrica para cargar sus baterías, el camión minero eléctrico llamado eDumper que traslada piedra caliza desde una montaña a una fábrica de cemento en la P'ery, Suiza, su recorrido desde la fábrica de cemento hasta la cima de la montaña, y desde montaña al tajo de la mina es de 7.8% y 7.1% respectivamente, Este camión parte vacío con 58 toneladas, para moverse utiliza la energía de sus baterías para el accionamiento eléctrico, hoy posteriormente cuando llega a mina y está cargado con 65 toneladas, hoy la energía se convierte al frenar el eDumper cargado de 123 toneladas que baja la montaña, y gana energía mediante el sistema de frenado regenerativo, teniendo una relación de peso carga/camión de 1.12, concluyendo que los camiones eléctricos con movimiento perpetuo pueden lograr tener una eficiencia de su ciclo de batería en un 90%. Asimismo, la referencia [8] a través de un análisis técnico y económico describe muestras existentes de vehículos de cantera, entre ellos se encuentra el eDumper que fue diseñado a partir de un Komatsu 605-7HD, el cual se describe como un camión con frenado regenerativo capaz de recargar sus baterías por si solo al trasladarse montaña abajo con una pendiente de 13%, cuyas especificaciones técnicas más resaltantes son una capacidad de 65 toneladas de carga, 8,5 m de largo y 4,2 m de ancho y alto, mientras que sus baterías pesan 4.5 toneladas y suministran una energía de 600 kWh en su ascenso, las baterías se encontraban a un 90% inicialmente, luego de ascender tenía un 80%, y al descender las baterías quedaron cargadas al 88%, es decir, casi la misma carga del inicio, se contabilizaron 20 viajes ida y vuelta del eDumper. En síntesis, el camión volquete minero eléctrico eDumper es una gran alternativa en la modernización de los camiones mineros eléctricos.

Según la bibliografía revisada y examinada, se logró sintetizar las posturas e ideas más resaltantes de los autores consultados, los cuales a través de diferentes metodologías, consideraron la eficiencia productiva, la viabilidad económica, las características técnicas y la autonomía de los camiones eléctricos en operación como factores determinantes, de igual forma, cada autor, consideró en sus análisis los costos energéticos, factores geológicos, económicos y productivos de los países en donde realizaron sus investigaciones. A partir de esto, los autores emitieron sus conclusiones, sosteniendo que, es inevitable el emplear fuentes de energía alternativa para los camiones mineros como lo es la energía eléctrica. para los fines de esta investigación, tendremos en consideración las características técnicas, económicas y operativas de los camiones eléctricos, dando enfoque en su productividad y eficiencia en las operaciones mineras para cumplir requerimientos de la minería peruana actual, todo ello, con el propósito final de

identificar si la electrificación en los camiones mineros es beneficiosa, tanto como para la explotación minera (si cumple con las exigencias productivas) como con los costos operativos (si los reduce).

II. TEORÍA

A. Acarreo por camión minero eléctrico

El camión minero eléctrico se describe como un vehículo de transporte de gran tamaño que se alimenta completamente mediante electricidad proporcionada a través de baterías a bordo o mediante conexión eléctrica. No necesita utilizar combustible para su tracción y puede recuperar eficientemente energía durante el frenado, sin generar contaminación. Mientras se encuentra en movimiento, un motor diésel convierte energía química en energía mecánica para accionar un generador, el cual produce energía eléctrica que se dirige al motor para hacer girar las ruedas. Durante el proceso de frenado, la energía cinética de las ruedas se transfiere de nuevo al motor, el cual funciona como un generador para convertir esta energía de frenado en electricidad. Finalmente, esta energía eléctrica se disipa en forma de calor debido a la resistencia del frenado, lo que constituye la característica más destacada de los camiones mineros eléctricos [4].

B. Ciclo de operación

El ciclo de operación comprende todas las acciones llevadas a cabo durante el transporte de minerales o material estéril, teniendo en cuenta las fases de carga, traslado, descarga y regreso [9].

$$\begin{aligned} \text{TIEMPO DE CICLO} &= T_c + T_t + T_d + T_r \\ \text{TIEMPO DE CICLO} &= T_f + T_v \end{aligned} \quad (1)$$

T_r : Tiempo de transporte
 T_d : Tiempo de descarga
 T_r : Tiempo de retorno
 T_f : Tiempo fijo
 T_v : Tiempo variable

A continuación, se presenta la Fig. 1, la cual muestra un ciclo de acarreo minero tradicional que indica la operación de carguío de material hacia los camiones, los cuales tienen como destino los botaderos o los puntos de acopio.

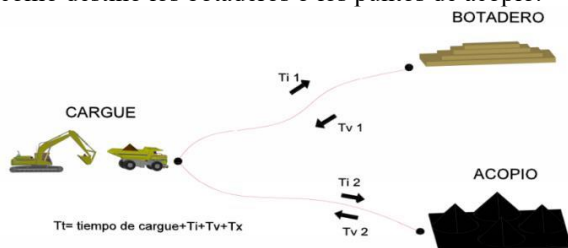


Fig. 1. Tiempo de ciclo de acarreo con rutas a botadero y acopio. adaptado de [10].

C. Costos de operación

Estos son los costos relacionados con un activo adquirido que surgen a lo largo de su vida útil, con el objetivo de respaldar las operaciones de producción, lo que abarca las actividades necesarias para mantener en óptimas condiciones sus elementos y componentes [11].

D. CAPEX

El término CAPEX (Capital Expenditure) hace referencia a todos los desembolsos de capital destinados a la adquisición o mejora de activos productivos con el fin de aumentar la capacidad o eficiencia de una empresa. En este

análisis actual, debido a las políticas estratégicas de la compañía, se consideran como CAPEX las inversiones importantes en componentes y equipos nuevos, así como ciertas inversiones en el mantenimiento de componentes críticos que implican desembolsos significativos [11].

E. OPEX

El término OPEX (Operating Expenses) se relaciona con los gastos continuos necesarios para garantizar la operación ininterrumpida de un negocio, lo que incluye costos asociados al mantenimiento de equipos y el suministro de insumos esenciales para la producción y funcionamiento del negocio. En este estudio específico, se consideran como OPEX todos los gastos relacionados con la fuerza laboral, supervisión, operación y adquisición de suministros esenciales para mantener la producción de los activos bajo análisis [11].

F. Costos de mantenimiento y reparación

El gasto relacionado con el mantenimiento y las reparaciones suele representar una parte significativa de los costos asociados a los equipos. Las operaciones de minería pueden exponer los equipos a un desgaste significativo, si bien la magnitud de este desgaste puede variar notablemente según los tipos de equipos que utilizan y las condiciones del trabajo. Los costos totales del mantenimiento y reparaciones se derivan de la combinación los costos por mano de obra, que involucra a los mecánicos, y los costos de piezas de repuestos necesarias [12].

$$CMR = CMO + R \quad (2)$$

CMR = Costo de mantenimiento y reparación

CMO = Costo de mano de obra de mecánicos

CR = Costo de los repuestos

G. Grasas, filtros y lubricantes

Para analizar el uso de lubricantes, la fuente más fiable son los registros de modificaciones del dueño o el encargado de la maquinaria. En ausencia de estos registros, se pueden utilizar los datos proporcionados por el fabricante. Por lo general, se estima que el costo de grasas, filtros y lubricantes representa entre el 13% y 15% del costo total de combustible [12].

H. Costo de llantas o neumáticos

El costo relacionado con la reparación y sustitución de neumáticos es un aspecto significativo a tener en cuenta. La vida útil de un neumático está sujeta a numerosas variables, como el mantenimiento, la presión de inflado, el peso de carga del equipo, las condiciones de la vía, la velocidad de desplazamiento, las distancias recorridas, las curvas y pendientes de la vía, la posición e inclinación de la llanta en la máquina (delanteras, traseras, de dirección o de tracción), la carga, entre otros. Estos factores influyen en la duración y el rendimiento de los neumáticos y, por lo tanto, en los costos asociados con su reparación y reemplazo. Para la determinación del costo por hora de los neumáticos se puede lograr con la siguiente fórmula [13]:

$$\text{Costo hora Neumático} = \frac{\text{Costo del neumático(US\$)}}{\text{Vida útil del neumático(h)}} \quad (3)$$

I. Costo de baterías

El costo asociado al capital de la batería no se limita únicamente al precio de la batería por kilovatio-hora (kWh), sino que también depende de la duración de las baterías, ya que estas pueden soportar miles de ciclos de carga y descarga.

Si la vida útil de las baterías es corta, se requerirán reemplazos de las mismas, ya que la vida útil del vehículo en términos de kilómetros recorridos superará la duración de la batería. Debido a esta consideración, hoy en día es posible calcular un costo por paquete de baterías por cada kilómetro recorrido, lo que proporciona una medida de la autonomía de las baterías por kilómetro [14].

J. Reemplazo de equipos

En la gestación de un plan de reemplazo, resulta de vital importancia considerar el progreso económico de una empresa. Un reemplazo prematuro o inoportuno puede dar lugar a una disminución del capital de la empresa, lo que a su vez impide la asignación de recursos a otros proyectos rentables. Por otro lado, un reemplazo tardío conlleva costos excesivos en la operación, debido a disminuciones en el rendimiento y a gastos continuos de mantenimiento. Por consiguiente, es esencial que la empresa establezca políticas para el reemplazo de equipos; de no hacerlo, se encontraría en desventaja con respecto a otras empresas en el mismo sector [13].

K. Valor actual neto (VAN)

El Valor Presente Neto (VAN) es un método que implica traer al presente los flujos de efectivo futuros relacionados con un proyecto o inversión, considerando la inversión inicial realizada en el año cero del proyecto. El VAN permite la suma de distintos costos y beneficios a lo largo de varios periodos, incluso cuando no pueden sumarse directamente debido a que el valor del dinero cambia con el tiempo, es decir, el dinero de hoy no tiene el mismo valor que el dinero en el futuro. Para solucionar este problema, el VAN "actualiza" los costos y beneficios futuros utilizando una tasa de descuento, convirtiéndolos en flujos de efectivo expresados en términos del valor actual, para luego sumarlos. Si el VAN resulta positivo, se considera viable el proyecto; de lo contrario, se rechaza. El VAN, matemáticamente se expresa de la siguiente forma [15]:

$$VAN = \frac{B_1}{(1+i)^1} + \frac{B_2}{(1+i)^2} + \frac{B_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{B_n}{(1+i)^n} - I_0 \quad (4)$$

$$VAN = \sum_{n=1}^n \frac{B_n}{(1+i)^n} - I_0 \quad (5)$$

L. Tasa interna de retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es el porcentaje al cual el Valor Presente Neto (VAN) se iguala a cero. En consecuencia, una afirmación precisa sería que una inversión que promete un rendimiento superior al costo de oportunidad del capital es una oportunidad de inversión válida. Dicha tasa se expresa de esta manera [16]:

$$VAN = \frac{B_1}{(1+i)^1} + \frac{B_2}{(1+i)^2} + \frac{B_3}{(1+i)^3} + \dots + \frac{B_n}{(1+i)^n} - I_0 = 0 \quad (6)$$

La ecuación para poder calcular la TIR se expresa a continuación: Análisis técnico-económico de reemplazo de flota de camiones Diésel por camiones eléctricos en las canteras de Yura 5

$$VAN = \sum_{n=1}^n \frac{B_n}{(1+i)^n} - I_0 = 0 \quad (7)$$

Si, $TIR >$ tasa de descuento (i): El proyecto es aceptable.

M. Relación beneficio-coste (B/C)

El costo-beneficio es un método de evaluación de proyectos de inversión que se deriva de la comparación entre los flujos de beneficios actualizados y los flujos de costos actualizados generados por el proyecto. La expresión matemática para calcularlo suele ser la siguiente [16]:

$$B/C = \frac{\sum \frac{B_t}{(1+i)^t}}{\sum \frac{C_t}{(1+i)^t}} \quad (8)$$

El estándar para la toma de decisiones implica que la relación entre los beneficios (B/C) debe ser superior a 1, lo que significa que los beneficios a lo largo del tiempo (B_t) superan los costos a lo largo del tiempo (C_t).

$$B/C > 1$$

Si se aplica a escenarios mutuamente excluyentes, se debe considerar el mayor.

III. METODOLOGÍA

La metodología a aplicar en esta investigación no manipulará los datos de las variables, la información empleada será proveniente de la revisión bibliográfica y de fichas técnicas de los fabricantes, con ello, se podrá aplicar el método Choosing By Advantages (CBA), el cual fue desarrollado por [17], con ello, se evaluará el reemplazo de la flota de estudio, el cual permitirá realizar una toma de decisiones efectiva, teniendo en consideración los atributos de las alternativas, determinar factores y criterios específicos, para finalmente evaluar los costos y la importancia de sus ventajas.

Las variables anteriormente mencionadas, son dependientes e independientes. Las independientes en su mayoría son costos como, el energético, de combustible, de adquisición, de mantenimiento, de consumibles y por otro lado el número de camiones, capacidad de carga y velocidad. Las variables dependientes son los costos de acarreo y la productividad de camiones.

Las técnicas a aplicar para la toma de decisión comprendidas en el Choosing By Advantages (CBA), tienen por objetivo evaluar las ventajas competitivas de las alternativas existentes, para poder tomar la decisión de continuar con el uso de camiones diésel o realizar el reemplazo por camiones eléctricos, dichas técnicas se especificarán a continuación:

a) Identificar alternativas en función a la similitud de especificaciones técnicas de los Vehículos pesados actuales con equipos de acarreo híbridos con funcionamiento de diésel y energía eléctrica o sus similares accionados con energía eléctrica utilizando fuentes bibliográficas como Scopus y Onemine.

b) Definir los factores de evaluación como lo serían las variables relacionadas a los costos actuales de la flota de equipos de acarreo en Yura, a través de su selección por su relevancia en una hoja de cálculo.

c) Definir los criterios deseados para cada factor con los estándares de producción diaria, tiempo de ciclo y; valores que se encontraran con la ayuda de hojas de cálculos.

d) Resumir los atributos de las alternativas propuestas como su capacidad de carga, la altura de los camiones, el ancho de los camiones, el tipo de energía para su funcionamiento y velocidad máxima. Dichos datos se extraerán de las fichas técnicas de los respectivos vehículos.

e) Decidir las ventajas representativas de cada una de las alternativas ya sean mejoras en costos de energía, costos de adquisición, costos de mantenimiento y/o mejoras en la productividad, Aplicando las herramientas del VAN y TIR.

$$VAN = \sum_{n=1}^n \frac{B_n}{(1+i)^n} - I_0 \quad (5)$$

$$VAN = \sum_{n=1}^n \frac{B_n}{(1+i)^n} - I_0 = 0 \quad (7)$$

f) Decidir la importancia de las ventajas, siendo de nuestro interés la eficiencia productiva y la relación costo beneficio.

g) Evaluar los costos de la implementación identificando la relación de beneficio costo.

$$B/C = \frac{\sum \frac{Bt}{(1+i)^n}}{\sum \frac{Ct}{(1+i)^n}} \quad (8)$$

La investigación será aplicada al posible reemplazo de una flota de 11 camiones mineros de la marca y modelo Komatsu HD 465 y como muestra una única unidad de donde se extraerá la información y especificaciones como la carga útil de 55 toneladas. Así, se podrá realizar el análisis comparativo del apartado técnico y económico con la propuesta de equipo alternativa que son los camiones eléctricos.

Para ello, se emplearán instrumentos de redacción como Mendeley y Microsoft Word, asimismo, la bibliografía será extraída de las bases de datos bibliográficas Scopus y Onemine. Para finalmente analizar los costos y producciones mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel y haciendo uso del software de modelamiento Modellus 4.

Para la estimación de los costos operativos de los camiones eléctricos a baterías, se hará uso del modelo matemático hecho por [14] contenido en su información suplementaria, para la ejecución de este modelo matemático, se introducirán los valores de las variables específicas de acuerdo con las especificaciones técnicas del modelo de camión eléctrico que se propone para esta investigación.

Para los fines de esta investigación, se mostrarán las ecuaciones concernientes a los costos operativos de: Inversión, interés, seguro, combustible (energía eléctrica), mantenimiento, operador y estación de carga.

Las principales ecuaciones y sus correlaciones extraídas del modelo matemático de [14] se detallan en las siguientes ecuaciones 9.1-9.2, 10.1-10.6 y 11.1-11.9, las cuales están contenidas en el Anexo 1.

IV. RESULTADOS

Se tiene que la flota de estudio está comprendida por 11 camiones Komatsu HD465, diariamente, estos camiones realizan el acarreo de caliza en una distancia de 20 kilómetros desde las canteras hasta la faja transportadora (que tiene destino la planta cementera) y cada viaje de ciclo de acarreo (desde la cantera hasta la faja ida y vuelta) demora 2 horas. Fuente [18]. A continuación, se visualiza la ruta de acarreo en las canteras de Yura en la siguiente Fig. 2:



Fig. 2. Trayecto de transporte de los camiones. Fuente: [18].

A. Camiones Diésel Komatsu HD 465

1) *Cálculo de ciclo de acarreo de camiones Komatsu HD465*: La flota de camiones Komatsu tiene una capacidad de carga real de 50 TM, trabajan 12 horas por día y tienen que cumplir una demanda de 3300 TM de caliza transportada por día según [19]. A continuación, se muestra en la Tabla 2 el cálculo de número de ciclos de acarreo diarios, el cual es 6 ciclos por día, recorriendo 20 kilómetros ida y vuelta durante 12 horas.

TABLA 1
CÁLCULO DE CICLO DE ACARREO. FUENTE: PROPIA.

Número de camiones	Capacidad real de camión/ viaje	Tiempo de ciclo	Tiempo de trabajo diario	Ciclos por día	Tonelaje total por día
11	50TM	2 horas	12 horas	6	3300 TM

2) *Productividad y eficiencia de la flota de camiones: Diésel Komatsu HD465*: En la siguiente Tabla 2 se realiza el cálculo de tonelaje entregado por la flota a la planta. El tonelaje transportado por la flota es de 3300 TM / día, mensualmente es 99000 TM y anualmente es de 1188000 TM de caliza entregados a planta.

TABLA 2
CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE FLOTA DE CAMIONES. FUENTE: PROPIA.

Tonelaje entregado por día	Días trabajados por mes	Tonelaje entregado por mes	Tonelaje entregado por año
3300 TM	30 días	99000 TM	1188000 TM

Por lo tanto, el indicador de productividad que deben cumplir los camiones diésel Komatsu HD 465 es de 275 TM/Hr.

3) *Consumo de diésel y costos de combustible*: Asimismo, la flota de los 11 camiones Komatsu tiene un consumo individual de 10 Gal/Hr estimado de la ficha técnica [20], se procede a mostrar en la siguiente Tabla 3 el cálculo del consumo de combustible Diésel.

TABLA 3
CONSUMO DE DIÉSEL DE LA FLOTA. FUENTE: PROPIA.

Número de Flota	Horas/ día	Horas/ mes	Consumo de Diésel / Hora	Consumo Diésel / Día	Consumo Diésel / Mes
11	12 horas	360 horas	10 galones	1320 galones	475200 galones

Habiéndose **obtenido** el consumo de diésel por la flota de los 11 camiones, y con un precio de combustible de 2.9 \$/Gal según [21], se procede a realizar el cálculo del costo de combustible de la flota en la Tabla 4. Determinado un consumo mensual de 475200 Galones, dicho consumo equivale a un **Costo de Combustible de 114840 US\$ al mes**.

TABLA 4
COSTO DE COMBUSTIBLE. FUENTE: PROPIA.

Precio de Diésel	Diésel / Hora	Consumo Diésel / Hora	Consumo Diésel / Día	Consumo Diésel / Mes
2.9 \$/Gal	10 \$	319 \$/Hr	3828 \$/Hr	114840 \$/Hr

4) *Cálculo de costo operativo (OPEX) de acarreo*: El costo de operación (OPEX) para un camión Diésel Komatsu HD-465 es de 76.7 \$/Hr, y para la flota comprendida por 11 camiones es de 839.9 \$/Hr tal como se evidencia en la tabla 5. El detalle de la estimación de cada ítem se encuentra en el Anexo 1. En la siguiente Tabla 5 se procede a desglosar los costos horarios que componen el costo de operación de la flota diésel.

TABLA 5
CÁLCULO DE COSTO OPERATIVO OPEX DE ACARREO.
FUENTE: PROPIA.

Ítem de Costo Horario	Costo horario por camión (\$/Hr)	Costo horario por flota (11) (\$/Hr)
Costo Filtros	3.4	37.4
Costo Lubricantes	2.2	23.7
Costo Grasas	0.98	10.8
Costo Neumáticos	13.7	151.1
Costo Mantenimiento	3	30
Costo Combustible	29	319
Costo Operador	2.8	30.5
Costo horario de inversión	16.6	182.1
Costo horario de Seguro	4.3	47.1
Costo horario de interés	0.7	8.6
TOTAL	76.7	839.9

Cabe resaltar que, **el costo de combustible representa un 38% de dicho costo operativo**, mientras que otros costos significativos son: costo de inversión y costo de neumáticos que corresponde a un 22% y 18% respectivamente, tal como se presenta en la siguiente Fig. 3.

Costo Operativo de Camiones Diésel (\$/Hr)

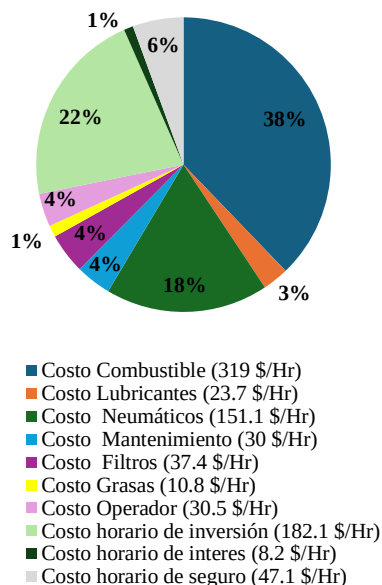


Fig. 3. Distribución del Costo Horario de Camiones Diésel. Fuente: Propia.

5) *Cálculo de costo unitario (\$/TM) de acarreo*: El cálculo del costo unitario representa cuánto cuesta transportar una tonelada de mineral (caliza), recordando que, **el costo de acarreo representa más del 50%** del costo total de explotación. El cálculo de costo unitario de acarreo se aprecia en la siguiente Tabla 6, resultando que **el costo unitario de acarreo de la flota de camiones Komatsu HD-465 es de 3.05 \$/TM**.

TABLA 6
CÁLCULO DE COSTO UNITARIO DE ACARREO. FUENTE: PROPIA.

Costo Horario Acarreo flota (\$/Hr)	Horas trabajadas por día (Hr)	Costo de Acarreo diario (\$)	Tonelaje requerido diario (TM)	Costo Unitario de Acarreo (\$/TM)
840.3	12	10083.6	3300	3.05

B. Camiones Eléctricos Yutong YTK90E

Para el reemplazo de la flota de camiones Diésel por camiones eléctricos se considerará el camión puramente eléctrico marca Yutong modelo YTK90E, con una capacidad nominal de 60 Toneladas Métricas (TM), dicho ejemplar de camión se aprecia en la Fig. 4.



Fig. 4. Camión eléctrico Yutong YTK90E. Fuente: [22]

1) *Especificaciones técnicas*: El modelo elegido para el reemplazo de la flota de equipos diésel a eléctricos es un Yutong YTK90E, con una capacidad de carga útil de 60 toneladas nominales, pero con una carga efectiva real de 55TM, la capacidad estimada del motor es de 500Kw, presenta un torque de 5000 N.m y tiene una velocidad promedio de 40 km/Hr con un consumo aproximado de 400Kw/Hr.

2) *Productividad y eficiencia de la flota de camiones Yutong YTK90E*: La demanda mínima establecida por la planta de producción es de 3300 Toneladas de Caliza por día, sin embargo, la capacidad de carga de los camiones eléctricos es de 55 TM de carga real, este detalle hace que la flota entregue mínimamente 3630 Toneladas de Caliza por día. Teniendo ello en cuenta, el Indicador de Rendimiento de la flota eléctrica será de 302.5 TM/Hr.

3) *Costos Operativos de Acarreo de camión eléctrico Yutong YTK90E*: Para el cálculo y estimación de los costos operativos de un camión eléctrico modelo Yutong YTK90E se ejecutó el modelo matemático formulado por [14], dicho modelo está contemplado para hallar el costo operativo de un camión eléctrico pesado a baterías, el cuál considera el costo por kilómetro (\$/Km), sin embargo, para fines de esta investigación se hace necesario realizar la conversión a costo por hora (\$/Hr).

Nota: Los costos correspondientes a consumibles, tales como: paquete de baterías, neumáticos, grasas, filtros y lubricantes están contemplados en el costo de mantenimiento. El costo operativo de un camión eléctrico Yutong YTK90E es equivalente a 42.4 \$/Hr, mientras que para la flota que también está comprendida por 11 unidades, el costo operativo de la flota de camiones eléctricos Yutong YTK90E corresponde a 547.8 \$/Hr.

En la siguiente Tabla 7 se desglosan los costos operativos de un camión eléctrico Yutong YTK90E.

TABLA 7
 CÁLCULO Y ESTIMACIÓN DE COSTOS OPERATIVOS DE
 ACARREO DE CAMIONES ELÉCTRICOS YUTONG YTK90E.
 FUENTE: PROPIA.

ITEM DE COSTO	(\$/Km)	(\$/Hr)	Flota (11)
Costo de Inversión	1.21	24.2	266.2
Costo de Interés	0.04	0.8	8.8
Costo de Seguro	0.17	3.4	105.6
Costo de combustible (E. Eléctrica)	0.29	5.8	63.8
Costo de Mantenimiento	0.48	9.6	105.6
Costo de equipo de carga	0.16	3.2	35.2
Costo de Operador	0.14	2.8	30.8
TOTAL COSTO OPERATIVO	2.49	42.4	547.8

Asimismo, la distribución porcentual de los costos operativos de la flota de camiones eléctricos Yutong YTK90E de acuerdo con la Fig. 5, se observa que, los costos más altos y representativos son: Costo de Inversión (266.2 \$/Hr) con un 49% de incidencia y el Costo de Mantenimiento (105.6 \$/Hr) con un 19% respectivamente. Es importante resaltar que, el costo de combustible (que también puede ser entendido como costo de consumo energético o costo de energía eléctrica) que tiene un valor total de 63.8 \$/Hr, solo equivale a un 12% del costo operativo.

Costo Operativo de Camiones Eléctricos (\$/Hr)

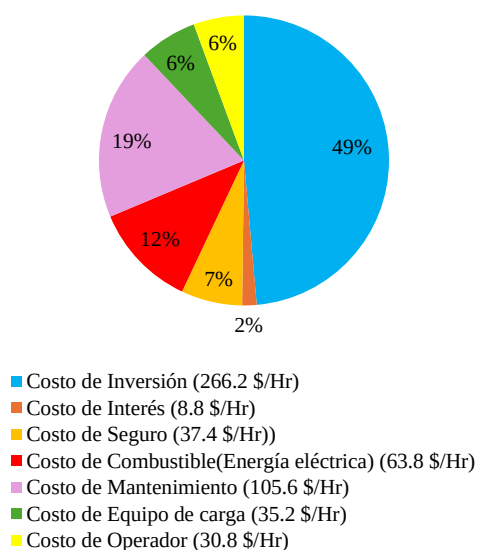


Fig. 5. Distribución de Costo Horario de Camiones Eléctricos. Fuente: Propia.

4) *Cálculo de costo unitario (\$/TM) de acarreo:* El cálculo del costo unitario representa cuánto cuesta transportar una tonelada de mineral (caliza), en este punto, es necesario aclarar que, el camión Yutong YTK90 tiene una capacidad real de carga útil de 55TM (5 toneladas más que el camión Diesel), lo que implica que, los 11 camiones entregarán un estimado de 3630 TM diarios, es decir, transportarán 10% más de mineral requerido hasta la planta.

Sin embargo, teniendo en cuenta la premisa anterior, el requerimiento de planta (debido a su capacidad instalada) es de 3300 TM, por ello, el cálculo de costo unitario se realizará

en base a este tonelaje requerido, lo que resulta en un costo unitario de 1.99 \$/TM.

El cálculo del costo unitario de los camiones eléctricos Yutong YTK90E se presenta en la siguiente Tabla 8

TABLA 8
 CÁLCULO DE COSTO UNITARIO DE LA FLOTA YUTONG YTK90.
 FUENTE: PROPIA.

Costo Horario Acarreo de la flota (\$/Hr)	Horas trabajadas por día (Hr)	Costo de Acarreo diario (\$)	Tonelaje requerido diario (TM)	Costo unitario de Acarreo (\$/TM)
547.8	12	6573.6	3300	1.99

C. Análisis técnico comparativo de Camiones Diésel Vs Camiones Eléctricos

De acuerdo con la Figura 6, el gráfico comparativo de los equipos a diésel Komatsu HD465 y eléctricos Yutong YTK90E muestra que, según [20] y [22], la potencia del motor en HorsePower (Hp) y Kilowatts (Kw) son mayores en los equipos de combustión interna en un 12.2%, dicha diferencia de potencia no supone una ventaja notable, ya que la potencia suele beneficiar una conducción a altas velocidades, no siendo este el caso. Por otra parte, en el caso del torque requerido los equipos eléctricos, estos cuentan con más del doble siendo este un 148% más que en el caso de los Komatsu lo que proporciona una clara ventaja en la operación, ya que un mayor torque permite al camión transportar cargas pesadas en terrenos difíciles.

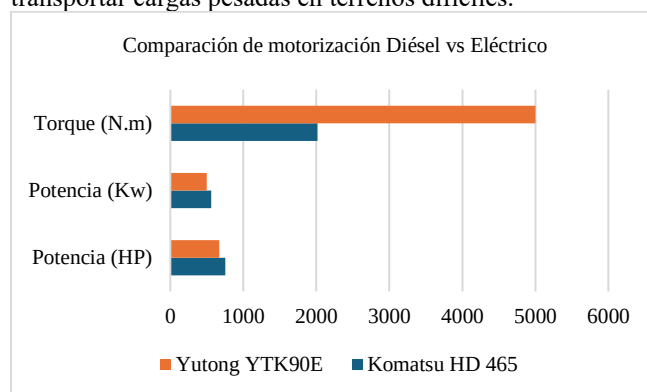


Fig. 6. Comparación de características de motorización de camiones diésel y eléctricos. Fuente: Propia.

La Fig. 7, muestra el gráfico comparativo de datos operativos, el cual describe una mayor velocidad máxima en los equipos Komatsu siendo 70 km/Hr, 75% más que los YTK90E; pese a ello la velocidad máxima no es un factor determinante debido que el ciclo de acarreo estimado requiere una velocidad media de 20 Km/Hr. En lo que respecta al peso bruto y seco los equipos a diésel son mayores 99,68 TM. y 43,1 TM. respectivamente. Sin embargo, lo importante es la carga útil que es donde destacan los equipos eléctricos cargando a su capacidad máxima 55 toneladas. Esto marca una ventaja significativa ya que cargarán 5 toneladas más por viaje a comparación de los equipos diésel (50 TM), lo cual repercute en su indicador de productividad (KPI) que asciende a 302.5 TM/Hr. Por lo tanto, la flota eléctrica Yutong es más productiva y eficiente que la flota diésel Komatsu en un 10%.

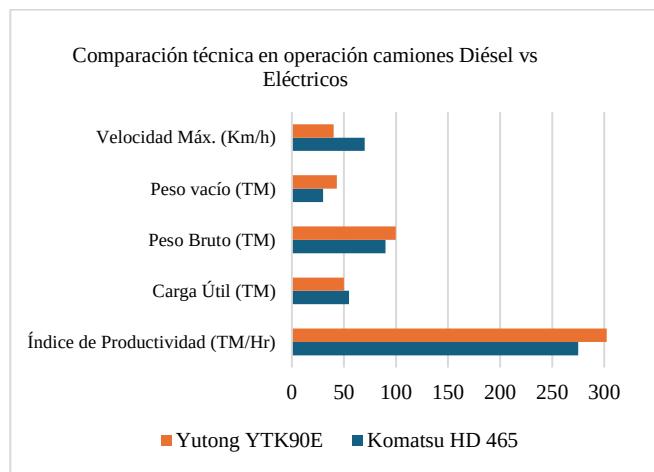


Fig. 7. Comparación técnica en operación de camiones diésel y eléctricos.
Fuente: Propia.

D. Análisis económico de Camiones Diesel Vs Camiones Eléctricos

1) *Comparación en costos de operación:* Para el análisis de los costos de Operación, en beneficio de lograr una comparación equivalente, se ha considerado que, el Costo de Mantenimiento de los camiones Komatsu HD645 estará

En lo que respecta al costo de mantenimiento, los camiones eléctricos tienen un costo más bajo que sus similares a diésel, con una diferencia de 112.2 \$/Hr.

De igual forma, el costo energético que comprende el consumo de combustible (319 \$/Hr) para el caso de los camiones diésel y el consumo de energía eléctrica (63.8 \$/Hr) para los camiones eléctricos, se evidencia una clara **diferencia de 255.2 \$/Hr que equivale a un ahorro de 80% en dicho costo.**

2) Comparación de costos unitarios de acarreo:

La diferencia en los indicadores del precio unitario (P.U.) es muy importante, debido a que, si se reduce el costo por tonelada transportada, se tendrá una importante reducción en el costo de producción de cemento, lo que consecuentemente incrementará la rentabilidad de la empresa.

El costo unitario de acarreo que ofrecen los camiones Komatsu HD-465 es de 3.05 \$/TM, debido al elevado costo de combustible (38% de su costo unitario). Mientras que, el costo unitario de acarreo que ofrecen los camiones Yutong YTK90E es de 1.99\$/TM (ya que su costo energético equivale a un 12%).

Esta marcada diferencia de 1.06 \$/TM en el costo unitario de acarreo, equivale a un ahorro de 34.75% en el costo por tonelada que se transporta desde las canteras hacia

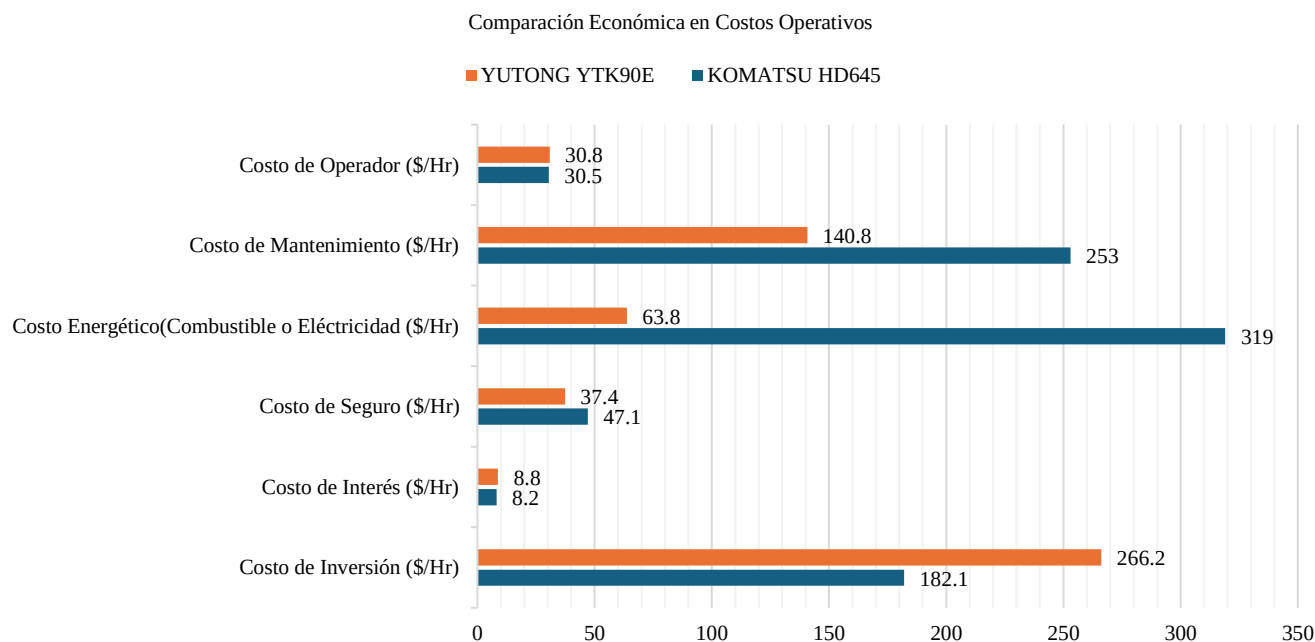


Fig. 8. Comparación económica según los costos operativos de camiones diésel y eléctricos. Fuente: Propia.

comprendido por: Costo de Mantenimiento (30 \$/Hr), neumáticos (151.1 \$/Hr), grasas (10.8\$/Hr), Lubricantes (23.7\$/Hr) y filtros (37.4 \$/Hr), la suma de estos costos da como resultado un **Costo de mantenimiento total de 253 \$/Hr**. Mientras que, para el caso de los camiones eléctricos YTK90E, el costo de mantenimiento comprenderá: El costo de mantenimiento (105.6 \$/Hr) sumado al costo de estación de carga (35.2 \$/Hr). Lo que da como Costo total de mantenimiento de **140.8 \$/Hr**. A partir de esta premisa, se realiza la comparación económica en base a los costos operativos en la Fig. 8, de la cual, se observa que, en el caso de los costos de operador no existe una diferencia significativa.

la planta de procesamiento. La comparación de costos unitarios se realiza en la Fig. 9.

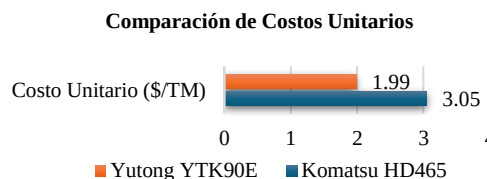


Fig. 9. Comparación de costos unitarios de acarreo. Fuente: Propia.

3) *Comparación económica Financiera:* Para realizar el cálculo de la caja de flujo económica y financiera, se consideró que, la compañía minera terceriza los equipos de carguío, por lo tanto, se consideró un ingreso constante a lo largo del tiempo de vida de ambos proyectos. Asimismo, ambos modelos de volquete ofrecen un tiempo de vida útil estimado de 7 años, considerando un interés de 7.25%.

Según el Flujo de caja anual de los Camiones Komatsu HD465 contenido en la Figura 10, se tiene un VAN equivalente a \$ 15,106,025.38, con una tasa de rentabilidad (TIR) de 49.87% y el periodo de recuperación de la inversión es de 2.11 años. A continuación, se presenta el Cashflow que ofrecen los camiones Komatsu en la siguiente Fig. 10.

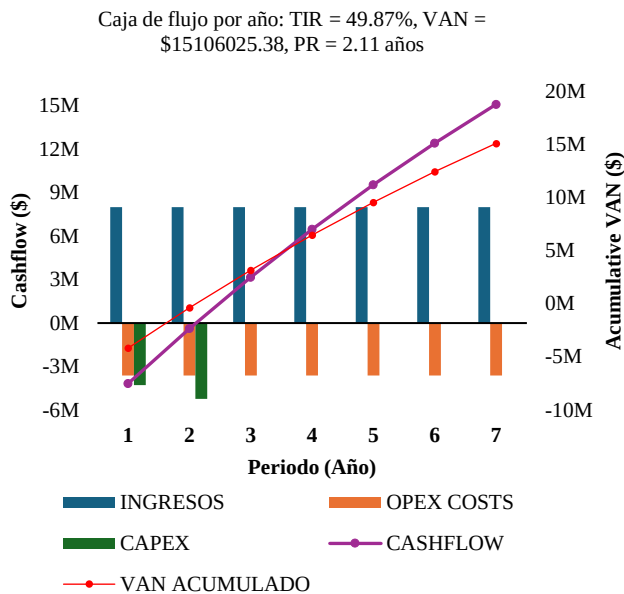


Fig. 10. Flujo financiero de camiones Diésel Fuente: Propia

De igual forma, según el flujo de caja anual de los Camiones eléctricos Yutong YTK90E contenido en la Fig. 11, se tiene un beneficio (VAN) equivalente a \$ 22,397,744.37, con una tasa de rentabilidad (TIR) de 73.48% y el periodo de recuperación de la inversión es de 1.46 años. A continuación, se presenta el Cashflow que ofrecen los camiones Yutong en la siguiente Fig. 11.

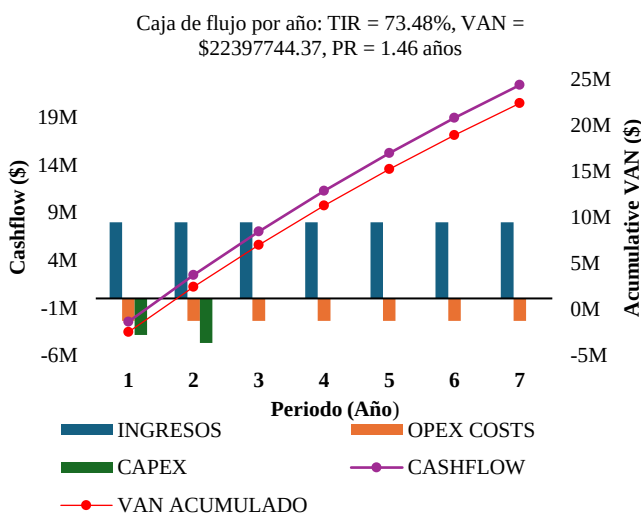


Fig. 11. Flujo financiero de camiones Eléctricos. Fuente: Propia

Luego de realizarse la comparación económica financiera, se evaluó que:

El proyecto Eléctrico (VAN= \$22397744.37) tiene un beneficio mayor que el proyecto Diesel (VAN= \$ 15106025.38), lo cual genera una diferencia positiva de \$ 7291718.99, lo que genera una ventaja atractiva para la inversión. En cuanto a las tasas internas de retorno, los camiones eléctricos ofrecen un retorno de 73.48% en un tiempo de 1.46 años, en contraste con los camiones diésel, los cuales presentan un retorno de 49.87% en 2.11 años.

De igual forma, es importante considerar el indicador Costo-Beneficio, para el caso de los camiones Komatsu HD465 se tiene un B/C= 1.55, mientras que, la flota eléctrica presenta un B/C = 2.10

$B/C_{\text{Diésel}} = 1.55 < B/C_{\text{Eléctricos}} = 2.10$

El proyecto de inversión de los camiones eléctricos ofrece un B/C mayor que el proyecto de camiones diésel, esta mejora se aprecia hasta en un excedente de 0.55 en dicha relación. Entonces, el proyecto de inversión de camiones Yutong YTK90E ofrece una mayor rentabilidad y beneficio para la inversión en un lapso de 7 años de operación. La comparación económica financiera se presenta en la Fig. 12.

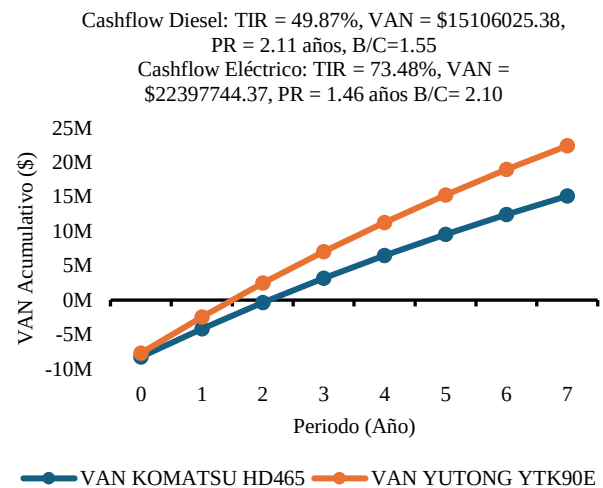


Fig. 12. Comparación económica financiera de ambos proyectos de inversión. Fuente: Propia.

V. DISCUSIÓN

En la Fig. 13 se presenta un resumen de los resultados comparativos de las ventajas que presentan los camiones eléctricos Yutong YTK90E frente a los Komatsu HD465, evidenciando reducciones significativas respecto a los costos, presentando una formidable reducción de 292.1 \$/Hr en el costo Operativo (-35%) y generando un ahorro importantísimo de 255.2 \$/Hr (-80%) en el costo energético (combustible o electricidad).

Asimismo, en cuanto a ventajas operativas, los camiones eléctricos se sobrepone con un torque 2.49 veces mayor que los camiones Diésel y ofrecen una productividad superior con una diferencia de 27.5 TM/Hr adicionales. Por último, en lo que respecta a finanzas, los camiones eléctricos proporcionan un incremento en el retorno de 23.61%. un menor periodo de recuperación de la inversión (1.46 años) y una mejor relación B/C equivalente a 2.1.

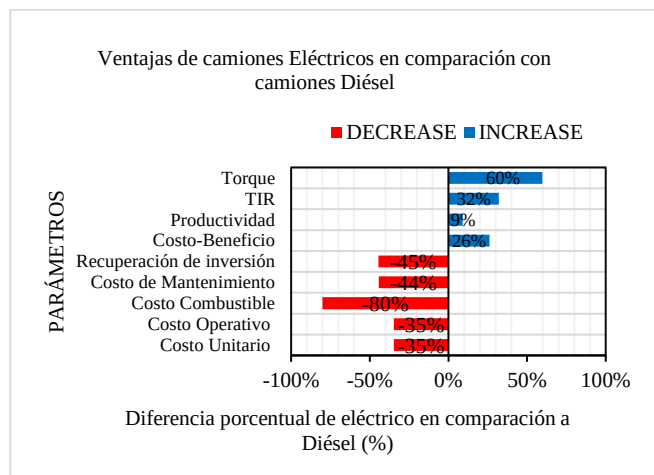


Fig. 13. Ventajas comparativas de camiones Diesel y eléctricos. Fuente: Propia.

VI. CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación a partir de la evaluación técnico-productiva evidenciaron que, los camiones eléctricos presentan un mejor performance (148% más de torque), y ofrecen un 10% más de producción. Asimismo, económicamente se demostró que los camiones eléctricos brindan un ahorro del 80% en el consumo energético y se redujeron los costos operativos en 292\$/Hr, proporcionando una optimización de 34.78%. De igual forma, se demostró que los camiones eléctricos son económicamente viables para la operación minera de estudio y ofrecen una mejor rentabilidad (TIR=73.48%) y con un periodo de recuperación de la inversión de 1.46 años. Esta investigación demuestra que, es factible tanto técnica como económicamente la implementación de camiones eléctricos en reemplazo de camiones diésel en minería no metálica a tajo abierto, demostrando que, los camiones eléctricos pueden adaptarse al entorno de trabajo de la cantera de estudio.

VII. RECOMENDACIONES

En la presente investigación se realizaron los cálculos y proyecciones con datos referenciales, aplicables a reales de los camiones de acarreo de minerales no metálicos Komatsu HD465, este estudio puede replicarse en cementeras con condiciones similares a la cantera de estudio. Se recomienda contemplar la inclusión de los equipos de carguío para lograr una mejor compatibilidad en la cadena de valor, en función de la necesidad y capacidad de la planta de procesamiento de mineral. Cabe resaltar que esta investigación se enfoca en el estudio de los camiones de acarreo por su elevado costo operativo. Se recomienda considerar las posibles fluctuaciones de los costos de la electricidad industrial en el tiempo, ya que según la fluctuación anual promedio entre los índices de precio en los últimos 10 años fue de 2.9% registrada por el Banco Central de Reservas del Perú. Por último, se recomienda considerar otras fuentes de energía alternativas como hidrógeno verde.

REFERENCIAS

[1] C. Jin, T. Yi, Y. Shen, A. Khajepour, and Q. Meng, "Comparative study on the economy of hybrid mining trucks for open-pit mining," IET Intelligent Transport Systems, vol. 13, no. 1, pp. 201–208, 2019, doi: 10.1049/iet-its.2018.5085.

[2] K. Everly, J. Pohl, A. Chowdu, and C. Utter, "Open-Pit Load & Haul Simulator : Exploring the Effects of Haul Truck Electrification on Mining Productivity," pp. 1–14, 2015.

[3] M. Volodarets, I. Gritsuk, I. Taran, V. Volkov, M. Bulgakov, and M. Izteleuova, "FEATURES OF MODERNIZATION OF A TRUCK WITH A HYBRID POWER TRANSMISSION" Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, no. 1, pp. 80–87, 2023, doi: 10.33271/nvngu/2023-1/080.

[4] H. Zhang, Y. Ma, Z. Yang, L. Wang, S. Guo, and B. Hao, "Study on energy conservation and emission reduction of pure electric non-road mining dump truck," in E3S Web of Conferences, 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202126801025.

[5] P. J. Terblanche, M. P. Kearney, and P. F. Knights, "Potential of on-board energy recovery systems to reduce the costs of Diésel-electric mine truck haulage," Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy, vol. 127, no. 4, pp. 195–208, 2018, doi: 10.1080/25726668.2018.1451611.

[6] E. Esfahanian and J. A. Meech, "Hybrid Electric Haulage Trucks for Open Pit Mining," IFAC Proceedings Volumes, vol. 46, no. 16, pp. 104–109, Jan. 2013, doi: 10.3182/20130825-4-US-2038.00042.

[7] J. D. Hunt et al., "Perpetual motion electric truck, transporting cargo with zero fuel costs," J Energy Storage, vol. 72, p. 108671, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108671.

[8] A. Kartashov, G. Harutyunyan, A. Kosolapov, and E. Shkarupelov, "Justification of the concept of creating a perspective dump truck," IOP Conf Ser Mater Sci Eng, vol. 779, no. 1, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/779/1/012028.

[9] A. Bazán, "Cálculo del número de unidades de la flota de camiones en el tajo abierto San Gerardo, perteneciente a la Compañía Minera Atacocha," 2016. [Online]. Available: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/2955>

[10] S. I. Molina Arenas, "Modelización de sistemas pala-camión a cielo abierto mediante el modelo de reparación de máquinas," 2021.

[11] L. Salas, "(2016). Análisis técnico-económico de la gestión de activos mineros móviles para la determinación del reemplazo económico óptimo de los equipos.,", 2016. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141003>

[12] E. P. Gransberg, D. D., & O'Connor, "Major Equipment Life-cycle Cost Analysis," 2015. [Online]. Available: <http://www.dot.state.mn.us/research/TS/2015/201516.pdfw>

[13] R. Belizario, "evaluación económica - financiera para reemplazar camiones de acarreo de mineral y desmonte en la unidad corihuarmi - minera i.r.l. yauyos - lima," 2017. [Online]. Available: http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/7104/Molleapa_Mamani_Joel_Neftali.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[14] B. Nykvist and O. Olsson, "The feasibility of heavy battery electric trucks," Joule, vol. 5, no. 4, pp. 901–913, 2021, doi: 10.1016/j.joule.2021.03.007.

[15] B. Lira, "Evaluación de proyectos de inversión," Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas., 2013.

[16] R. Chu, "Fundamentos de finanzas: un enfoque peruano," 2013.

[17] J. Suhr, *The Choosing By Advantages Decisionmaking System*. Westport, CT: Quorum, 1999, 293 pp.

[18] Ministerio de la Producción, "RESOLUCIÓN DIRECTORAL No 00232-2022-PRODUCE / DGAAMI," 2022. [Online]. Available: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3168104/rd_232-2022-produce-dgaami.pdf.pdf

[19] A. Huisa Supho, "Optimización de equipos de carguío y acarreo en el tramo Botaderos - Trituradora Thyssen Krupp, para el incremento de producción en una empresa cementera," Universidad Tecnológica del Perú, 2021. [Online]. Available: <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3152297>

[20] Komatsu Latin America, "HD465-7E0," Komatsu Latin America, 2023. [Online]. Available: <https://www.komatsulatinamerica.com/peru/productos/hd465-7e0/>.

[21] Banco Central de Reserva del Perú, "Precios de Combustibles - Petróleo Diesel," Banco Central de Reserva del Perú, 2023. [Online]. Available: <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/mensuales/resultados/PN01441PM/html>.

[22] ItalThai Industrial, "Yutong YTK90E," [Online]. Available: <https://italthaiindustrial.com/en/product/yutong-ytk90e/>. [Accessed: May 21, 2024].

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Anexo 1