

ANEXO 1

Información complementaria para la estimación del costo operativo de la flota de camiones Komatsu-HD465

1. Costo de adquisición

Para poder determinar el costo de adquisición del equipo de acarreo se debe adicionar al precio de compra del camión, el precio de los neumáticos y a esto descontar el valor de rescate del equipo (20% del precio de compra), obteniendo como resultado el valor neto del equipo.

Precio de compra del camión	\$ 750,000.00
precio de neumáticos(4)	\$ 16,480.00
Valor de rescate	-\$ 150,000.00
Valor neto del equipo	\$ 616,480.00

2. Costo horario de inversión

El cálculo horario de la inversión está condicionado por las horas de operación al año, la tasa de inversión del país (7.25%), el factor para costos de financiamiento y es dependiente del valor neto del equipo (hallado anteriormente en el costo de adquisición).

$$\left(\frac{(616,480.00 \$ * 7.25 \%)}{4320 \text{ Hr}} \right) * 1.6 =$$

Horas de operación por año	4320 Hr
Valor neto del equipo	616,480.00 \$
Tasa de inversión	7.25%
Factor para costo de financiamiento	1.6
Costo horario de Inversión	16.55 \$/Hr

3. Costo horario de seguro

Se logra determinar el costo por hora del seguro tomando en cuenta nuevamente las horas de operación por año, el valor neto del equipo y además la tasa porcentual del seguro (3%).

$$\frac{616,480.00 \$ * 3\%}{4320 \text{ Hr}} =$$

Valor neto del equipo	616,480.00 \$
Horas de operación por año	4320 Hr
Tasa de seguro	3%
Costo Horario de seguro	4.28 \$/Hr

4. Costo horario de interes

El interés expresado en \$/Hr se alcanza con la interacción de las variables del valor neto del equipo, la vida útil en horas, la tasa de interés (7.25%) y el factor (0.5).

$$\frac{616,480.00 \$ * 7.25\% * 0.5}{30,000 Hr} =$$

Valor neto del equipo	616,480.00 \$
Vida útil en horas	30,000 Hr
Tasa de interés	7.25%
Factor	0.5
Costo horario de interés	0.74 \$/Hr

5. Costos de consumibles(neumáticos)

La estimación del costo horario por camión se realiza con el precio de neumáticos dividido entre la vida util en horas.

Precio de neumaticos	16,480.00 \$
Vida útil de neumáticos	1200 Hr
Costo horario por camión	13.7 \$/Hr

6. Costos de filtros, lubricantes y grasas

Los valores estimados de filtros, lubricantes y grasas para un camión Komatsu-HD465 acorde al mercado son:

Costo horario de filtros	Costo horario de lubricantes	Costo horario en grasas
3.4 \$/Hr	2.15 \$/Hr	0.98 \$/Hr

7. Costo de Operador

El costo de los operadores va de acuerdo al mercado, se debe considerar los meses de trabajo del año, las horas de operación al año y el costo horario se puede estimar de acuerdo a ello:

$$\frac{1000 \$ * 11 * 12}{4320} =$$

Costo operador / mes	# de operadores	Meses de Operación	Costo horario de operación	Costo horario de operación
1000 \$	11	12	4320 Hr	30.6 \$/Hr

Información complementaria para la estimación del costo operativo de la flota de camiones Yutong YTK90E extraída de [1]

Camión eléctrico a baterías:

Costo por km:	$Cb_{km}(W) = DEb_{km}(W) + CCb_{km}(W) + FCb_{km}(W) + ICb_{km}(W) + MCb_{km}(W) + ESEV_{km}(W)$	[USD × km ⁻¹]
Costo de operación por km:	$COb_{km}(W) = Cb_{km}(W) + (CCb_{km}(W) + ICb_{km}(W)) \times t_c \times t^{-1} + d_{ch} \times t_c \times R^{-1}$	[USD × km ⁻¹]

Ecuaciones de costos

Camión eléctrico a baterías:

Costo capital:	$DEb_{km}(W) = DEd_{km}(W) + BPC_{km}$	[USD × km ⁻¹]
Intereses del costo capital:	$CCb_{km}(W) = r \times 100^{-1} \times 0.5 \times DEb_{km}(W)$	[USD × km ⁻¹]
Costo de Combustible:	$FCb_{km}(W) = p_e \times Ed(W) \times ecr^{-1} \times ((100 - chlo) \times 100^{-1})^{-1}$	USD × km ⁻¹
Costo de seguro:	$ICb_{km}(W) = DEb_{km}(W) \times DEd_{km}(40t)^{-1} \times icbv_{km}$	[USD × km ⁻¹]
Costo de mantenimiento:	$MCb_{km} = MCd_{km} \times f_m \times 100^{-1}$	[USD × km ⁻¹]
Costo del equipo de carga:	$ESEV_{km}(W) = c \times BC_u(W) \times t_c \times R^{-1} \times chcp_h$	[USD × km ⁻¹]

Diesel:

Costo capital:	$DEd_{km}(W) = v_{km}^{-1} \times ppbv(W)$	[USD × km ⁻¹]
----------------	--	---------------------------

Ecuaciones adicionales, variables dependientes

Rango necesario camión eléctrico a baterías:	$R = V_{av} \times t$	[km]
Costo del paquete de baterías de camión eléctrico:	$BPC_{km}(W) = BC_n(W) \times bpc \times cl^{-1} \times R^{-1}$	[USD × km ⁻¹]
Capacidad de la batería nominal:	$BC_n(W) = BC_u(W) \times (1 + bm \times 100^{-1})$	[kWh]
Capacidad de la batería utilizable:	$BC_u(W) = R \times Ed(W) \times ecr^{-1}$	[kWh]
Velocidad promedio:	$V_{av} = f_r \times v_f + (1 - f_r) \times v_u$	[km × h ⁻¹]
Consumo energético vehículo	$Ed(W) = (e_{d,f}(W) \times D_f + e_{d,u}(W) \times D_u) \times R^{-1}$	[kWh × km ⁻¹]
diésel: Distancia en libre circulación:	$D_f = f_r \times t \times v_f$	[km]
Distancia en urbano:	$D_u = R - D_f$	[km]
Relación de consumo de energía:	$ecr = (ecr_f \times D_f + ecr_u \times D_u) \times R^{-1}$	[#]
Ahorro de peso del tren de potencia	$ws = y^*(y_1 * W + y_0)$	[Kg]

Especificaciones de los conjuntos de parámetros del paquete de baterías.

Parámetros	Valor	Fuente y sensibilidad
bpc: Costo del paquete de baterías por kWh USD/kWh	1000 USD/kWh	Valor conservador de la literatura reciente, usado para nuestra estimación. Valor estimado a partir de [2]
Sp: Energía específica del paquete de baterías Wh/kg	0,125 kWh/kg	0,125 kWh/kg según [3] – Representativo de valores conservadores en la literatura reciente sobre camiones eléctricos de batería
cl: ciclo de vida de la batería	5000 cycles	[4] señala que está entre 1000 – 8000, se considerará 5000 ciclos para la estimación con un 70% de capacidad restante – Representante de la literatura reciente sobre cátodos NMC.

Valores de parámetros predeterminados

Parámetros	Shot yam	Unidad	Valor	Fuentes y análisis de sensibilidad
Precio base vehículo	ppbv	USD	700000	700.000 USD por un camión del modelo especificado en el estudio. El análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre la variación típica en los datos.
Uso energético diésel (flujo libre)	ed,f	kWh \times km-1	4.5	Aproximadamente 4,5 kWh/km para un camión de 40 t, se empleará lo mismo para un camión de 60t. El análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre la variación en [5] Y [6]
Uso energético diésel (urbano)	ed u	kWh \times km-1	7	Aproximadamente 7 kWh/km para un camión de 40 t, se empleará lo mismo para un camión de 60t. $\pm 33\%$ del análisis de sensibilidad cubren la variación en [5] Y [6]
Capacidad de carga (para camión diésel)	lc	Kg		$lc = 60t \cdot y_1 + y_0$, cuyos valores para $y_1 = 8.33$ y para $y_0 = 306$. La sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre la variación con un amplio margen.
Contras de energía. Relación (flujo libre)	ecrf	#	2.5	En camiones eléctricos, para hacer suposiciones más conservadoras, se utiliza una relación de 2,5. El análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre la variación de los datos.
Contras de energía. Relación (urbano)	ecru	#	4.5	En camiones eléctricos, para hacer suposiciones más conservadoras, se utiliza una relación de 4,5. El análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre la variación de los datos.
Tiempo entre cargas	t	h	4.5	Tiempo de conducción típico entre descansos según la regulación del Reglamento de la UE (CE) n.º 561/2006. El análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre alguna variación en el tiempo de conducción, pero el tiempo de conducción también puede considerarse una suposición exógena y esto se analiza en el texto principal
Fracción de tiempo ciclo de conducción de flujo libre	ff	#	0.75	Supuesto representativo de una combinación de ciclos de conducción de entrega regional y de larga distancia Rexeis et al.22. El análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre una amplia gama de condiciones de conducción entre aproximadamente el 50 % y el 100 % en un ciclo de conducción de flujo libre
Costo de mantenimiento	mcf1000 km	%	0.00115	Porcentaje conservador para esta simulación. El análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre la variación en los datos en1.
Costo de los conductores	right	USD \times h -1	16.24	Costo promedio y asumido en Perú, y el análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre una variedad de condiciones
Base de costos del seguro vehículo	icbvkm	USD \times km-1	5	Costo del seguro modelado. El análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$ cubre una amplia gama de condiciones globales

Tiempo dedicado a cargar	tc	h	0.67	Patrones de carga rápida típicos del 80 % de carga en 40 minutos según vehículos personales. El análisis de sensibilidad de ± 33 % cubre la variación en el tiempo de carga presente en vehículos personales.
Vida útil del vehículo	vkm	km	1000000	Los camiones diésel pesados suelen recorrer una distancia del orden de un millón de kilómetros. El análisis de sensibilidad de ± 33 % cubre una amplia gama de condiciones con tiempos de vida más largos y más cortos en diferentes segmentos
Velocidad promedio en ciclo de conducción de flujo libre	vf	km \times h -1	40	Valores según el camión de estudio. El análisis de sensibilidad de ± 33 % cubre una amplia gama de condiciones operativas.
Velocidad promedio en ciclo de conducción urbana	vu	km \times h -1	20	Valores según el camión de estudio. El análisis de sensibilidad de ± 33 % cubre una amplia gama de condiciones operativas con una velocidad urbana promedio entre 15 y 25 km/h.
Margen de batería factor	bm	[%]	45	La relación entre la capacidad nominal y útil de la batería surge del factor compuesto del 5% de margen en el SOC inferior, el 20% agregó un margen para cargar solo el 80% para permitir una carga rápida en 40 minutos y, finalmente, agregó un 15% de capacidad adicional para compensar la pérdida promedio de 100% inicial hasta 70% final de capacidad restante en la batería. Factor final $1,05 \times 1,2 \times 1,15 = 1,45$, es decir, 45% adicional ± 33 %. El análisis de sensibilidad cubre un factor de 1,3 a 1,6.
Tasa-C de carga de batería	c	[h-1]	2	Los perfiles de energía actuales para la carga rápida de vehículos personales al 80% en 40 minutos requieren una tasa C máxima de aproximadamente 1 - 1.5, para este camión se empleará 2 y el análisis de camiones encuentra que una tasa de C similar es suficiente. Se estima que el análisis de sensibilidad de ± 33 % cubre un rango de variación más amplio del necesario para lograr esta carga rápida.
Costo del cargador por Hora	chcph	USD \times kW-1 \times h-1	0.07	Estimaciones modeladas del costo de carga rápida en literatura reciente sobre camiones eléctricos de batería y precios de carga rápida de vehículos personales. El análisis de sensibilidad de ± 33 % cubre un rango de variación más amplio que la variación observada en los valores en la literatura, pero el parámetro podría tener una mayor incertidumbre.
Precio electricidad (Usuario industrial)	pe	USD \times kWh-1	0.15	Precio de la electricidad en Perú según el Banco Central de Reservas el Perú. Del 25% al 75% de los precios mundiales varían entre aproximadamente ± 33 % del análisis de sensibilidad
Pérdidas de carga	chlo	%	10	Eficiencia del cargador 97-98% Eficiencia de carga de la batería de iones de litio aproximadamente 93%, es decir, la mitad de la eficiencia típica de ida y vuelta (carga y descarga) de una batería de iones de litio del 85 al 90%. Eficiencia de carga total de aproximadamente 90 % y ± 33 %. El análisis de sensibilidad cubre una variación del 87 % y 93 %.

Mantenimiento BEV factor	fm	%	60	Fracción del costo de mantenimiento del diésel en la literatura con un rango entre 0,4 y 0,81, cubierto con un análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$
Tasa de interés	r	%	7.25	Costo de capital promedio ponderado típico en Perú. La variación está cubierta con un análisis de sensibilidad de $\pm 33\%$.
Poder específico ahorro de peso	y	Kg x kW-1	6.9	Se asume 6.9 de ahorro de peso(Kg) en el tren motriz por cada Kilowatt(kW) generado por el tren de potencia.

Consideraciones para el uso del modelo matemático:

Para el modelamiento de datos es importante destacar que algunos de los valores se adecuaron, por ejemplo: El precio de la electricidad en Perú (país donde se realiza este estudio) es de \$0.15 según el Banco Central de Reservas del Perú, siendo diferente al precio que utiliza el autor del modelo.

Es de vital importancia destacar este dato ya que, para replicar el mismo trabajo en otros entornos de minería de agregados, no solo se debe considerar las condiciones operativas, también es obligatorio reevaluar los costos considerando el precio de la electricidad dependiendo del país; es recomendable considerar las fluctuaciones en el tiempo de los precios de la electricidad industrial de Perú. Según , entre los años 2014 -2024 la fluctuación anual promedio entre los índices de precio en los últimos 10 años fue de 2.9%. [7].

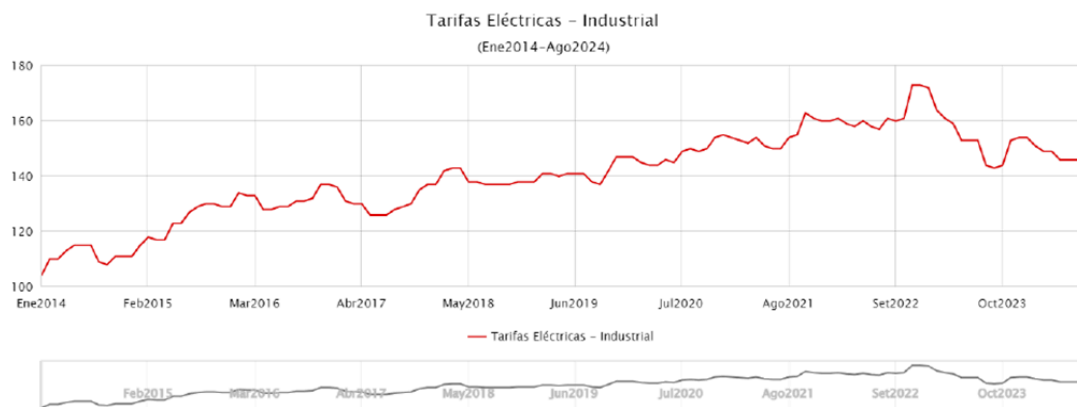


Figura 1. Índice de tarifas industriales (2014-2024), adaptado de [7].

Referencias:

- [1] 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.
- [2] IDTechEx, "How CATL's US\$57/kWh Battery Would Transform Electric CAM Machines," *North American Clean Energy*, Jun. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.nacleanenergy.com/energy-storage/idtechex-discusses-how-catl-s-us-57-kwh-battery-would-transform-electric-cam-machines>.
- [3] I. Mareev, J. Becker, and D. Sauer, "Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation," *Energies*, vol. 11, p. 55, 2018.
- [4] M. Tanco, L. Cat, and S. Garat, "A break-even analysis for battery electric trucks in Latin America," *Journal of Cleaner Production*, vol. 228, pp. 1354-1367, 2019.
- [5] H. Liimatainen, O. van Vliet, and D. Aplyn, "The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis," *Applied Energy*, vol. 236, pp. 804-814, 2019.
- [6] H. Liimatainen and M. Pöllänen, "Trends of energy efficiency in Finnish road freight transport 1995–2009 and forecast to 2016," *Energy Policy*, vol. 38, pp. 7676-7686, 2010.
- [7] Banco Central de Reserva del Perú. "Consulta de series estadísticas." [En línea]. Disponible: <https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/consulta/grafico>.