



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

***Benchmarking* aplicado al consumo energético de
camiones en una mina**

Autor: Alberto Izquierdo Ruiz

Tutores: Teresa de Jesús Alonso Sánchez

Miguel Ángel Rey Ronco

Oviedo, Julio de 2016



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
1. OBJETIVO.....	8
2. INTRODUCCIÓN.....	9
2.1. Benchmarking.....	11
2.2. Antecedentes.....	12
3. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Desarrollo del modelo.....	16
3.2. Procedimiento de cálculo.....	25
3.2.1. Cálculo de la velocidad óptima.....	25
3.2.2. Cálculo del SFC para las diferentes rutas.....	25
3.2.3. Cálculo del número de camiones para satisfacer la demanda de la excavadora para cada ruta.....	26
4. REALIZACIÓN DE LOS CÁLCULOS.....	27
4.1. Datos previos.....	27
4.2. Disposición en planta del equipamiento en la mina.....	30
4.3. Cálculo de las velocidades óptimas.....	32
4.4. Cálculo del SFC para las diferentes rutas.....	33
4.4.1. Ruta C ₁ -E ₁	34
4.4.2. Ruta C ₁ -E ₂	35
4.4.3. Ruta C ₁ -E ₃	35
4.4.4. Ruta C ₂ -E ₁	36
4.4.5. Ruta C ₂ -E ₂	37



4.4.6.	Ruta C ₂ -E ₃	38
4.5.	Cálculo del número de camiones para satisfacer la demanda de la excavadora para cada ruta.....	40
4.5.1.	Ruta C ₁ -E ₁	41
4.5.2.	Ruta C ₁ -E ₂	43
4.5.3.	Ruta C ₁ -E ₃	44
4.5.4.	Ruta C ₂ -E ₁	45
4.5.5.	Ruta C ₂ -E ₂	47
4.5.6.	Ruta C ₂ -E ₃	48
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	49
5.1.	Comparativa de SFC real con SFC del modelo.....	50
5.2.	Variación del SFC global al modificar otros parámetros de cálculo. Análisis de sensibilidad.	52
5.2.1.	Análisis de sensibilidad	54
5.3.	Comparación del consumo global real con el consumo global utilizando los datos del modelo.....	56
6.	CONCLUSIONES	58
7.	LÍNEAS FUTURAS	60
8.	REFERENCIAS	61



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Consumo energético anual en minería en EEUU (US Department of Energy, 2007)	10
Figura 2: Reparto del consumo energético en minas a cielo abierto (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014).....	11
Figura 3: Esquema de mina a cielo abierto (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014).....	15
Figura 4: Diagrama de flujo para el cálculo del SFC (Fuente propia)	24
Figura 5: Curva de potencia del motor de los camiones (Fuente propia).....	29
Figura 6: Curva de consumo específico al freno (Fuente propia)	30
Figura 7: Esquema con la disposición actual del equipamiento de la mina (Fuente propia)	31
Figura 8: Introducción de las condiciones para el cálculo de las velocidades óptimas (Fuente propia)	32
Figura 9: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo de las velocidades óptimas (Fuente propia)	33
Figura 10: Hoja de cálculo con los resultados del SFC en la ruta C1-E1 (Fuente propia) 34	
Figura 11 : Hoja de cálculo con los resultados del SFC en la ruta C1-E3 (Fuente propia) 36	
Figura 12: Hoja de cálculo con los resultados de SFC en la ruta C2-E1 (Fuente propia) . 37	
Figura 13: Hoja de cálculo con los resultados de SFC en la ruta C2-E2 (Fuente propia) . 38	
Figura 14: Hoja de cálculo con los resultados de SFC en la ruta C2-E3 (Fuente propia) . 39	
Figura 15: Aspecto de la hoja de cálculo con las nuevas variables (Fuente propia)	40
Figura 16: Hoja de cálculo explicativa de la ejecución del Solver para el cálculo del nº de camiones (Fuente propia)	41



Figura 17: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones para la ruta C1-E1 (Fuente propia) 42

Figura 18: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C1-E2 (Fuente propia)..... 43

Figura 19: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C1-E3 (Fuente propia)..... 45

Figura 20: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C2-E1 (Fuente propia)..... 46

Figura 21: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C2-E2 (Fuente propia)..... 47

Figura 22: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C2-E3 (Fuente propia)..... 48



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables involucradas en el modelo, por orden de aparición en el modelo	16
Tabla 2: Datos de operación y topográficos de la mina (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014).....	27
Tabla 3: Datos generales del equipamiento de la mina (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014) (Caterpillar, 2012) (Caterpillar, 2012).....	28
Tabla 4: Parámetros del motor y físicos de los camiones (Caterpillar, 2012) (Caterpillar, 2012) (Caterpillar, 2016) (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014) (Eurotire, Inc.).....	28
Tabla 5: Características de las rutas actuales y carga a utilizar para el cálculo (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)	31
Tabla 6: Resultados del cálculo de las velocidades óptimas (Fuente propia)	33
Tabla 7: Resultados para la ruta C1-E1 (Fuente propia)	35
Tabla 8: Resultados para la ruta C1-E2 (Fuente propia)	35
Tabla 9: Resultados para la ruta C1-E3 (Fuente propia)	36
Tabla 10: Resultados para la ruta C2-E1 (Fuente propia)	37
Tabla 11: Resultados para la ruta C2-E2 (Fuente propia)	38
Tabla 12: Resultados para la ruta C2-E3 (Fuente propia)	39
Tabla 13: Resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C1-E1 (Fuente propia)...	43
Tabla 14: Resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C1-E2 (Fuente propia)...	44
Tabla 15: Resultados del cálculo del nº de camiones para la ruta C1-E3 (Fuente propia)	45
Tabla 16: Resultados del cálculo del nº de camiones para la ruta C2-E1 (Fuente propia)	46
Tabla 17: Resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C2-E2 (Fuente propia)...	47
Tabla 18: Resultados del nº de camiones en la ruta C2-E3 (Fuente propia)	48



Tabla 19: Velocidades óptimas del camión, calculadas en base al trayecto C1-E2 (Fuente propia)	49
Tabla 20: Resumen de cálculos del SFC para un camión (Fuente propia).....	49
Tabla 21: Resumen de cálculos del nº de camiones en cada ruta (Fuente propia)	49
Tabla 22: Comparación de SFC real y SFC calculado para cada ruta (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)	50
Tabla 23: Ahorro de combustible utilizando el modelo respecto a las condiciones de operación de la mina (Fuente propia)	51
Tabla 24: Datos de cálculo de la ruta C1-E2 (Fuente propia).....	52
Tabla 25: Variación de velocidades óptimas, nº de camiones y SFC al modificar la longitud (Fuente propia)	52
Tabla 26: Variación de velocidades óptimas, nº de camiones y SFC con la demanda de material (Fuente propia).....	53
Tabla 27: Variación de velocidades óptimas, nº de camiones y SFC con la carga del camión (Fuente propia).....	54
Tabla 28: Resultado del análisis de sensibilidad (Fuente propia).....	55
Tabla 29: Distribución real de la mina (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)	56
Tabla 30: Datos del modelo para el cálculo del SFC global de la instalación (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)	56



1. OBJETIVO

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es aplicar el método de *benchmarking* al transporte de material por camiones en una mina ubicada en India, con la premisa de reducir el consumo de combustible de dichos camiones.

En primer lugar, se hará una introducción al contexto energético en minería y se presentará la posibilidad de mejora respecto al consumo.

A continuación, se definirá el modelo matemático a utilizar para desarrollar el *benchmarking*, exponiendo las ecuaciones necesarias para el cálculo del indicador de consumo establecido, el SFC (*specific fuel consumption*), y las restricciones para ejecutar la optimización mediante programación lineal.

Se aplicará el modelo a los datos de una mina en la India, procedentes de trabajos previos, así como a los datos de camiones Caterpillar, proporcionados por la propia empresa. Se calculará el SFC para todas las rutas de transporte de la mina, tanto para un solo camión como para varios camiones por ruta, utilizando para todos los casos una velocidad óptima previamente hallada.

Tras esto, se analizarán los resultados, midiendo su sensibilidad frente a variaciones en diversos parámetros: material transportado, demanda de material, distancia, etc.

Finalmente, se establecerán las líneas futuras de este Trabajo, así como las conclusiones derivadas del mismo.



2. INTRODUCCIÓN

En el año 2015 se consumió una energía a escala mundial de 9301 Mtoe (millones de toneladas equivalentes de petróleo) (International Energy Agency, 2015), o lo que es lo mismo, casi 390 EJ ($3,9 \times 10^{20}$ J). De toda esta energía, el 30,3% fue destinado a fines industriales, repartido entre las distintas fuentes de energía, tales como carbón, petróleo, gas natural y electricidad (International Energy Agency, 2015).

El 34% de esa energía consumida por la industria correspondió a industrias no manufactureras: agricultura, silvicultura, pesca, minería y construcción (US Energy Information Administration, 2016), suponiendo la minería el 3% del consumo energético total de la industria (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014); es decir 3,55 EJ.

En la minería, el 21% de los costes de producción se los lleva el consumo energético (US Energy Information Administration, 2016), por lo que reducciones en el consumo energético podrían suponer grandes ahorros económicos a la larga. Según el Departamento de Energía de los EEUU (US Department of Energy, 2007), en EEUU se consumen 1248 trillones de Btu/año, o lo que es lo mismo, 1,31 EJ/año. Según el mismo informe, si se utilizaran las mejores técnicas disponibles ese consumo se vería disminuido a 1,04 EJ/año, y si además se aplicara I+D a la disminución de consumos energéticos esta cifra caería hasta los 0,61 EJ/año. En la siguiente figura puede apreciarse lo anteriormente explicado:

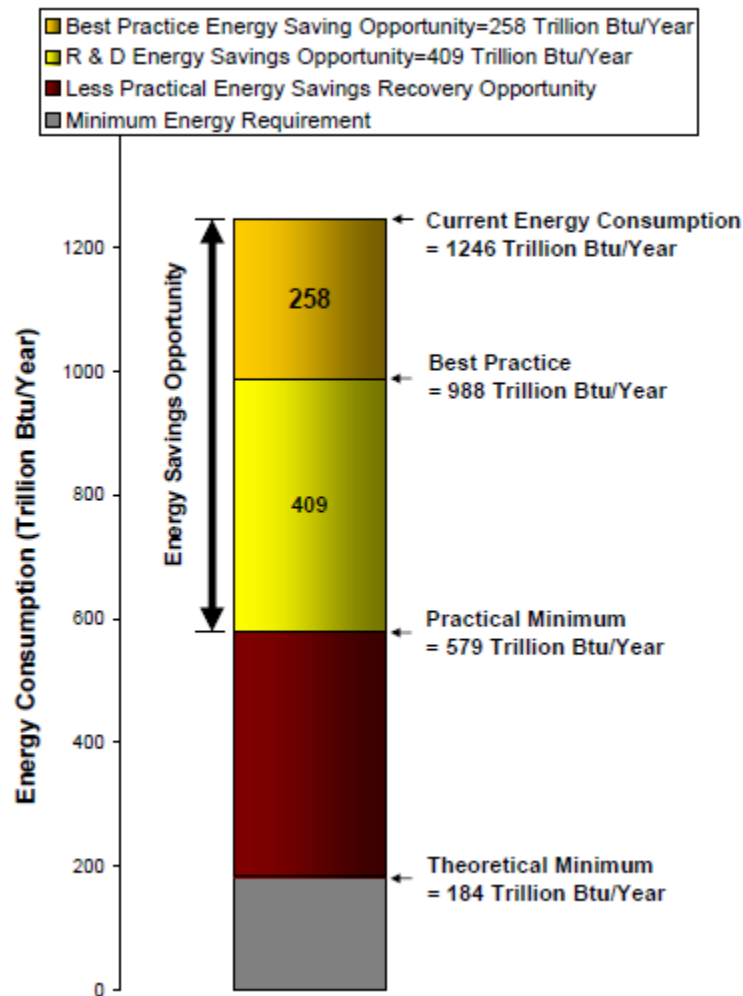


Figura 1: Consumo energético anual en minería en EEUU (US Department of Energy, 2007)

Por tanto, al reducir el consumo energético a más de la mitad, el coste energético también se verá reducido en la misma medida. Como se mencionaba anteriormente (US Energy Information Administration, 2016), el coste de la energía en minería constituye el 21% del coste total, por lo que con mejores técnicas disponibles e investigación, el coste total se vería considerablemente disminuido.

En el caso de minería a cielo abierto, el consumo energético se reparte como se muestra en la siguiente figura:

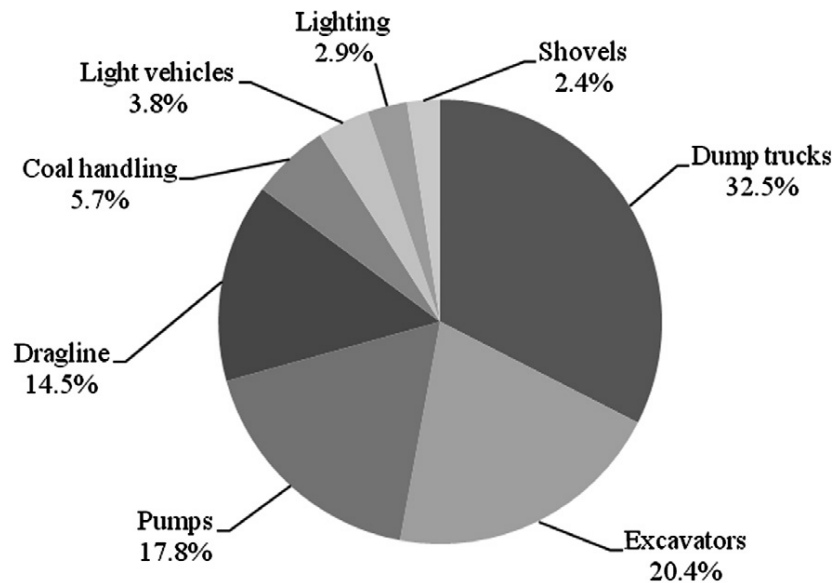


Figura 2: Reparto del consumo energético en minas a cielo abierto (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)

Como se puede observar, la mayor parte del consumo energético está asociado a los camiones de transporte de material, por lo que ahí radica uno de los puntos de ahorro más evidentes.

El hecho de que los camiones sean el principal coste de una mina a cielo abierto se debe a su continuo uso y al consumo de combustible de los mismos (diesel), por lo que la reducción del consumo de combustible de los camiones se erige como la principal medida a tomar.

2.1. Benchmarking

En este punto es donde aparece el *benchmarking*. Como se comentaba anteriormente (y se podía ver en la figura 1), simplemente aplicando las mejores técnicas disponibles el consumo energético se veía considerablemente reducido.

Los *benchmarks* son los objetivos de funcionamiento que utilizan esas mejores técnicas, y el *benchmarking* es el aprendizaje, búsqueda y aplicación de esas mejores técnicas al producto/servicio en cuestión (Camp, 2004). O dicho de otra forma, comparar el funcionamiento de un producto o servicio con los demás del mismo sector, para ver qué se está haciendo y cómo con respecto al resto. Esto permite deducir posibilidades de



mejora del producto o servicio, siendo el objetivo último utilizar las mejores técnicas y ser el mejor en el sector.

En el sector energético, estas técnicas se denominan “*benchmarking* energético”, y buscan reducir al máximo los consumos de energía con el máximo rendimiento. Según Boyd (The evolution of the ENERGY STAR energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use, 2008), el *benchmarking* es necesario para identificar el potencial comportamiento energético, así como para la gestión energética de una empresa.

2.2. Antecedentes

Existen una serie de trabajos previos que tratan sobre el *benchmarking* energético, entre los que se han seleccionado varios para la realización de este trabajo:

- **Boyd** (The evolution of the ENERGY STAR energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use, 2008) llevó a cabo un *benchmarking* en plantas industriales, de manera general, a través de un análisis estadístico mediante indicadores (EPI, *Energy Performance Index*), calculados con un modelo de regresión lineal. Se calcula el EPI para empresas de un mismo sector y se compara con el del resto, ubicándola mediante un percentil; a mayor percentil, mayor eficiencia energética.
- **Chung** (Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings, 2006) desarrolló un *benchmarking* para la demanda energética de edificios comerciales. Modela unos indicadores de eficiencia (*Energy Use Index*) mediante regresiones lineales multivariante, con los que hace un análisis estadístico (compara los EUI y los ubica por percentiles).
- **Holiastos** (Minimum hot/cold/electric utility cost for heat exchange networks, 2002) busca el mínimo coste de enfriamiento/calentamiento en intercambiadores de calor. Lleva a cabo análisis *pinch* (o análisis límite) junto con análisis exergético para evaluar el coste de enfriamiento/calentamiento.



- **Mui** (An energy benchmarking model for ventilation systems of air-conditioned offices in subtropical climates, 2007) aplica *benchmarking* al consume energético de sistemas de ventilación de oficinas con aire acondicionado. Evalúa un parámetro de eficiencia energética respecto a otras oficinas, realizando un análisis estadístico (ubicación por percentiles).
- **Omid** (Energy use pattern and benchmarking of selected greenhouses in Iran using data envelopment analysis, 2011) realiza *benchmarking* para el uso de energía y la eficiencia de la producción de invernaderos en Irán. Utiliza análisis DEA (*Data Envelopment Analysis*), que es un tipo de análisis que evalúa unas denominadas “unidades de toma de decisión” (DMU, *Decision-Making Units*), que permiten convertir una serie de parámetros de entrada en otros de salida para comparar y establecer el funcionamiento de lo que es objeto de estudio en diferentes áreas (Cooper, y otros, 2011).

Además de estos trabajos previos de *benchmarking*, también existen otros trabajos previos en materia de optimización en medios de transporte:

- **Chang** (Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption, 2005) creó un modelo para minimizar el consume de vehículos mediante la obtención de velocidades óptimas. Estas velocidades se obtienen con métodos lagrangianos.
- **Saboochi** (Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption, 2009) desarrolló un modelo con el que obtener una estrategia óptima de conducción, de forma que se reduzca el consumo aplicando unas restricciones, también denominado método de programación lineal.
- **Tolouei** (Vehicle mass as a determinant of fuel consumption and secondary safety performance, 2009) estableció un modelo para evaluar el efecto de la masa en el consumo energético y la seguridad de un modelo de coche determinado. Se calculan unos índices de seguridad y de consumo y se



comparan con los de otros modelos de coches, realizando un análisis estadístico, reflejado en nubes de puntos.

Para finalizar, también existe un trabajo previo de *benchmarking*, aunque no es un caso común, ya que no compara con otras empresas del sector:

- **Sahoo** (Energy Performance of Dump Trucks in Opencast Mine, 2010) (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014) utilizó *benchmarking* para transporte minero. Establece un parámetro de consumo de combustible a minimizar, mediante un modelo de programación lineal. El *benchmarking* en este caso, como se mencionó anteriormente, no es con otras empresas del sector, sino dentro de la propia mina, entre los diferentes trayectos que deben realizar los camiones.

Este antecedente es en el que está basado el presente Trabajo Fin de Máster, y del que se van a tomar diferentes datos en posteriores apartados del mismo.



3. METODOLOGÍA

En el presente Trabajo se va a utilizar un modelo de cálculo basado en programación lineal para calcular un índice de consumo energético de camiones (SFC, *specific fuel consumption*), con el que se realizará el *benchmarking*. Éste se aplicará a una mina a cielo abierto, concretamente a los trayectos que deben realizar los camiones entre excavadoras (lugar de extracción) y molinos (lugar de vertido).

La distribución general esquemática de una mina a cielo abierto es la que se presenta en la siguiente figura:

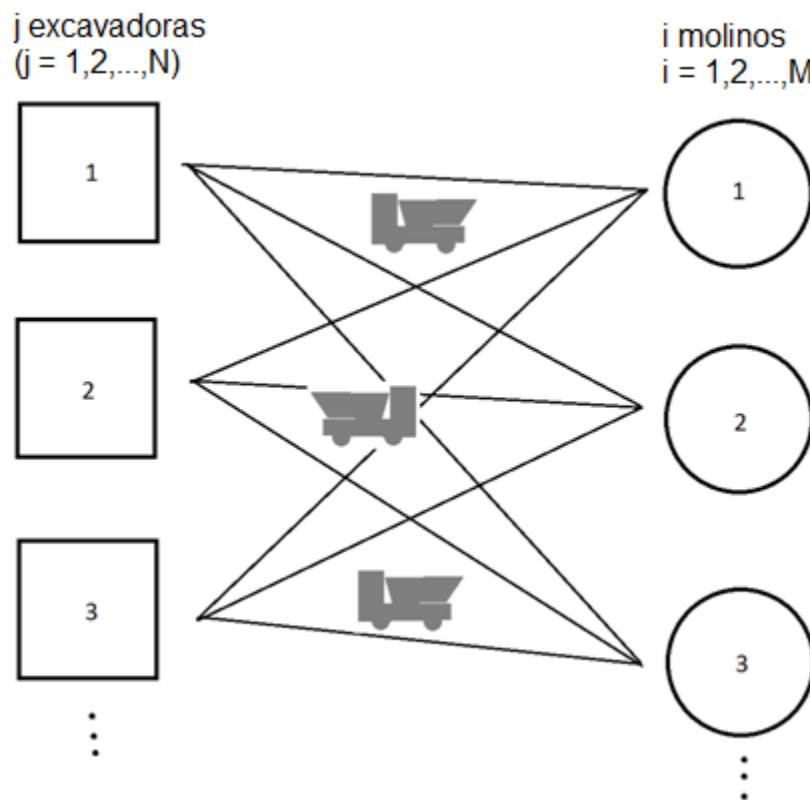


Figura 3: Esquema de mina a cielo abierto (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)

Como se puede observar, a las excavadoras (*excavators*) se les asigna subíndice j y a los molinos (*crushers*) se les asigna subíndice i . Esto servirá para identificar cada ruta que toman los camiones a la hora de calcular.



3.1. Desarrollo del modelo

El modelo utiliza fórmulas correspondientes a balances de masa, teoría de dinámica de vehículos y características del motor y equipamiento minero. Las variables utilizadas en dichas fórmulas se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 1: Variables involucradas en el modelo, por orden de aparición en el modelo

Variable (unidades)	Descripción	Variable (unidades)	Descripción
W_G (t)	Masa bruta del camión	a_1, a_2, a_3	Constantes de la curva característica de potencia
W_L (t)	Carga del camión	V_{max} (m/s)	Velocidad máxima que puede alcanzar el camión
W_E (t)	Masa del camión vacío	$B_{F,ce}$ (g/KW·h)	Consumo específico de combustible al freno cuando el camión va de un molino a una excavadora
P_{ce} (kW)	Potencia solicitada por el camión al ir de un molino a una excavadora	$B_{F,ec}$ (g/KW·h)	Consumo específico de combustible al freno cuando el camión va de una excavadora a un molino
P_{ec} (kW)	Potencia solicitada por el camión al ir de una excavadora a un molino	b_1, b_2, b_3	Constantes de la curva característica de consumo específico al freno
V_{ce} (m/s)	Velocidad del camión al ir de un molino a una excavadora	$m_{f,ce}$ (kg/h)	Consumo horario de combustible de un camión en un trayecto de molino a excavadora
V_{ec} (m/s)	Velocidad del camión al ir de una excavadora a un molino	$m_{f,ec}$ (kg/h)	Consumo horario de combustible de un camión en un trayecto de excavadora a molino
V_r (m/s)	Velocidad relativa del viento respecto al suelo	t_{ij} (h)	Tiempo de viaje desde el molino i hasta la excavadora j
U (m/s)	Velocidad del viento	t_{ji} (h)	Tiempo de viaje desde el molino i hasta la excavadora j
β (°)	Ángulo de incidencia del viento respecto a la dirección del camión	$M_{f,ij}$ (kg)	Consumo total de combustible de un camión en el trayecto entre el molino i y la excavadora j
L (km)	Distancia que recorre el camión entre un molino y una excavadora (y viceversa)	$m_{f,idle}$ (kg/h)	Consumo horario de combustible de un camión en vacío (motor en marcha)
a (kg/m)	Constante de resistencia al avance	t_{load} (h)	Tiempo de carga del camión
b (m/s ²)	Constante de resistencia a la rodadura y pendiente de la mina (ascendente/descendente)	t_{UL} (h)	Tiempo de descarga del camión
c (m/s ²)	Constante de resistencia a la rodadura y pendiente de la mina (descendente/ascendente)	t_{wait} (h)	Tiempo de espera del camión
C_d	Coefficiente de resistencia al avance	$t_{load,UL}$ (h)	Tiempos de carga y descarga sumados
ρ_{air} (kg/m ³)	Densidad del aire	t_{travel} (h)	Tiempo de viaje del camión



A_F (m^2)	Área frontal del camión	$t_{d,cycle}$ (h)	Tiempo total del ciclo de carga, trayectos y descarga
g (m/s^2)	Aceleración de la gravedad	n_d	Número de camiones
f	Coefficiente de fricción entre neumático y pavimento	x_{ce} (1/h)	Número de viajes por hora que realiza un camión entre un molino y una excavadora
C_{rr}	Coefficiente de resistencia a la rodadura	q_d (t/h)	Producción horaria teórica del camión
θ ($^\circ$)	Pendiente de la mina (si el camión sube lleno, es pendiente ascendente; si baja lleno, descendente)	SFC (g/t)	Consumo específico de combustible del camión
P_{max} (kW)	Potencia máxima del motor del camión	H (h/año)	Horas de trabajo anuales
ω (rpm)	Régimen de giro del motor	D (t/año)	Demanda de material anual
R_w (m)	Radio de la rueda del camión	Q_c (t/h)	Capacidad máxima de cada molino
G_R	Relación global de transmisión del motor del camión	Q_e (t/h)	Capacidad máxima de cada excavadora
$P_{avail,ce}$ (kW)	Potencia que entrega el motor al ir de un molino a una excavadora	X_{ij} (1/h)	Número total de viajes por hora en la ruta entre el molino i y la excavadora j
$P_{avail,ec}$ (kW)	Potencia que entrega el motor al ir de una excavadora a un molino		

Los nombres de las variables están tomados del artículo de Sahoo, para no complicar la implementación del modelo.

Antes de reflejar las ecuaciones se han de indicar una serie de suposiciones que se han tomado al seleccionar las ecuaciones:

- El tiempo de carga y el tiempo de descarga (t_{load} y t_{UL}) se suponen constantes (Energy Performance of Dump Trucks in Opencast Mine, 2010)
- Se toman perfiles de velocidad constantes, ya que minimizan el consumo (Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption, 2005)
- El efecto de aceleración y deceleración durante la marcha apenas tiene incidencia en la demanda de potencia del motor, por lo que no se tiene en cuenta (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)

A continuación se exponen las ecuaciones a utilizar. En primer lugar, se realiza el balance de masas. La masa bruta del camión es la suma de la carga del camión (que es el material que acarrea el camión en un viaje) y la masa del camión vacío, como muestra la ecuación [1]:



$$W_G = W_L + W_E \quad [1]$$

Además, la carga del camión no debe superar la carga máxima $W_{L,máx}$, fijada en las especificaciones del dúmper.

Tomando como base la teoría sobre dinámica de vehículos se calcula la potencia solicitada por el camión en un trayecto desde un molino a una excavadora (P_{ce}) y viceversa (P_{ec}). La potencia requerida se obtiene a partir de las fuerzas resistentes que debe vencer el camión, en este caso resistencia al avance, resistencia a la rodadura y resistencia en pendiente (Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption, 2005), así como a partir de los requerimientos de aceleración (MacKay, 2009):

$$P_{ce} = V_{ce} \cdot (a \cdot V_{r,ce}^2 + b \cdot W_E) + \frac{0,5 \cdot W_E \cdot V_{ce}^3}{L} \quad [2]$$

$$P_{ec} = V_{ec} \cdot (a \cdot V_{r,ec}^2 + c \cdot W_G) + \frac{0,5 \cdot W_G \cdot V_{ec}^3}{L} \quad [3]$$

Donde $V_{r,ce}$ y $V_{r,ec}$ son las velocidades relativas del viento en relación al terreno, y se calculan en función de la velocidad del viento (U), del ángulo de incidencia del viento respecto a la dirección del camión (β) y de la velocidad del camión ($V_{ce,ec}$). La ecuación es la siguiente:

$$V_r = V \pm U \cdot \cos \beta \quad [4]$$

El signo depende de si hay viento de cara (+) o viento de cola (-).

Las constantes a , b y c proceden de la agrupación de términos incluidos en las ecuaciones de Chang (Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption, 2005). Debido a que estamos ante una mina de pendiente descendente (descrito en la Tabla 1), el coeficiente de resistencia al avance, a la rodadura y a la pendiente del camión



cuando se traslada de la excavadora al molino (coeficiente c) tiene la componente de la pendiente negativa, ya que disminuye el requerimiento de potencia. Así:

$$a = \frac{C_d \cdot \rho_{\text{air}} \cdot A_F}{2} \quad [5]$$

$$b = g \cdot \cos \theta \cdot (f + C_{rr}) + g \cdot \sin \theta \quad [6]$$

$$c = g \cdot \cos \theta \cdot (f + C_{rr}) - g \cdot \sin \theta \quad [7]$$

Las siguientes ecuaciones sirven para el cálculo de la potencia disponible que puede entregar el motor del camión, en función de la velocidad del mismo. Habitualmente, las curvas de potencia de los motores se construyen en función del régimen de giro del motor. Este régimen de giro puede transformarse en velocidad lineal del camión mediante la fórmula:

$$V = \frac{R_w \cdot \omega}{2} \quad [8]$$

Si, previamente a la transformación de la velocidad angular en velocidad lineal, se halla la curva de tendencia de segundo grado de los datos de potencia en función del régimen de giro, y posteriormente se transforma el régimen de giro en velocidad lineal mediante la ecuación [8], se obtienen las curvas de potencia disponible en función de la velocidad del camión, cuyas ecuaciones, para trayectos molino-excavadora y excavadora-molino, son, respectivamente:

$$P_{\text{avail,ce}} = a_1 \cdot V_{\text{ce}}^2 + a_2 \cdot V_{\text{ce}} + a_3 \quad [9]$$



$$P_{\text{avail,ec}} = a_1 \cdot V_{\text{ec}}^2 + a_2 \cdot V_{\text{ec}} + a_3 \quad [10]$$

Donde a_1 , a_2 y a_3 son las constantes obtenidas al hallar la línea de tendencia de segundo grado.

Actuando de la misma manera, se obtienen las ecuaciones de consumo específico de combustible al freno, ya que también se dispone de esas curvas en función de la velocidad angular del motor. De esta forma:

$$B_{F,ce} = b_1 \cdot V_{ce}^2 + b_2 \cdot V_{ce} + b_3 \quad [11]$$

$$B_{F,ec} = b_1 \cdot V_{ec}^2 + b_2 \cdot V_{ec} + b_3 \quad [12]$$

Donde b_1 , b_2 y b_3 son las constantes obtenidas en el ajuste.

Multiplicando la potencia solicitada por el camión por el consumo específico al freno, se puede hallar el combustible por hora que consume un camión en cada trayecto (Energy Performance of Dump Trucks in Opencast Mine, 2010):

$$m_{f,ce} = P_{ce} \cdot B_{F,ce} \quad [13]$$

$$m_{f,ec} = P_{ec} \cdot B_{F,ec} \quad [14]$$

Aplicando la definición de velocidad lineal, se calculan los tiempos de recorrido entre un molino i y una excavadora j :

$$t_{ij} = \frac{L_{ij}}{V_{ce}} \quad [15]$$



$$t_{ji} = \frac{L_{ji}}{V_{ec}} \quad [16]$$

Sabidos los tiempos de traslado, de carga, de descarga y de espera, y conociendo el consumo por hora del camión en vacío (ralentí), se calcula el consumo total de gasolina por ciclo de carga/descarga en cada camión. Esto se consigue multiplicando el consumo de combustible de cada etapa por su duración y sumándolo todo (Energy Performance of Dump Trucks in Opencast Mine, 2010). Así:

$$M_{f,ij} = m_{f,ij} \cdot t_{ij} + m_{f,ji} \cdot t_{ji} + m_{f,idle} \cdot (t_{load,UL} + t_{wait}) \quad [17]$$

El tiempo total de ciclo se obtiene sumando todos los tiempos de cada etapa: carga, descarga y desplazamiento, ya que el tiempo de espera se toma como 0 para optimizar:

$$t_{d,cycle} = t_{load,UL} + t_{travel} = t_{load,UL} + t_{ce} + t_{ec} \quad [18]$$

Con el tiempo de ciclo, pueden calcularse los viajes por hora que realiza cada camión mediante la siguiente expresión:

$$x_{ce} = \frac{60}{t_{d,cycle}} \quad [19]$$

Cuyo resultado sirve para obtener la producción horaria de cada camión:

$$q_d = W_L \cdot x_{ce} \quad [20]$$

Conocidos todos estos datos, se puede hallar el consumo específico de combustible por tonelada acarreada, índice denominado *specific fuel consumption* o SFC:

$$SFC = \frac{x_{ce} \cdot M_{f,ce}}{q_d} \quad [21]$$



Como además de para un solo camión, también se desea minimizar el consumo para varios camiones en cada ruta. Para esto es necesario conocer el número de camiones que transitan por cada ruta, que se obtienen mediante la ecuación:

$$n_{dj} = \frac{t_{d,cycle,ij}}{t_{load}} \quad [22]$$

Con el número de camiones, se puede calcular el número total de viajes en una ruta por hora, mediante la expresión:

$$X_{ij} = n_{dj} \cdot x_{ij} \quad [23]$$

De esta forma, la ecuación a minimizar para el caso de varios camiones por ruta resulta en la siguiente:

$$SFC = \frac{H \cdot X_{ij} \cdot M_{f,ij}}{D_i} \quad [24]$$

Que estará sujeta a las siguientes restricciones:

$$X_{ij} \cdot W_L \cdot H \geq D_i \quad [25]$$

$$X_{ij} \cdot W_L \leq Q_{c,i} \quad [26]$$

$$X_{ij} \cdot W_L \leq Q_{e,j} \quad [27]$$

Si el número de camiones no sale un número entero, deberá tomarse o bien el número entero inferior (la producción será menor) o bien tomarse el número superior (habrá un exceso de camiones). En este caso, si hay un exceso de camiones éstos



tendrán que estar esperando un cierto tiempo para cargar, ya que el número de camiones es superior al óptimo. Ese tiempo de espera se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t_{\text{wait}} = n_d \cdot t_{\text{load}} - t_{d,\text{cycle}} \quad [28]$$

Esto repercutirá en la ecuación [18], quedando ésta como la que sigue:

$$t_{d,\text{cycle}} = t_{\text{load,UL}} + t_{\text{travel}} + t_{\text{wait}} = t_{\text{load,UL}} + t_{\text{ce}} + t_{\text{ec}} + t_{\text{wait}} \quad [29]$$

El número de variables y restricciones dependerá del número de excavadoras y de molinos que haya en la mina.

El diagrama de flujo que figura en la siguiente página explica el procedimiento de cálculo del SFC.

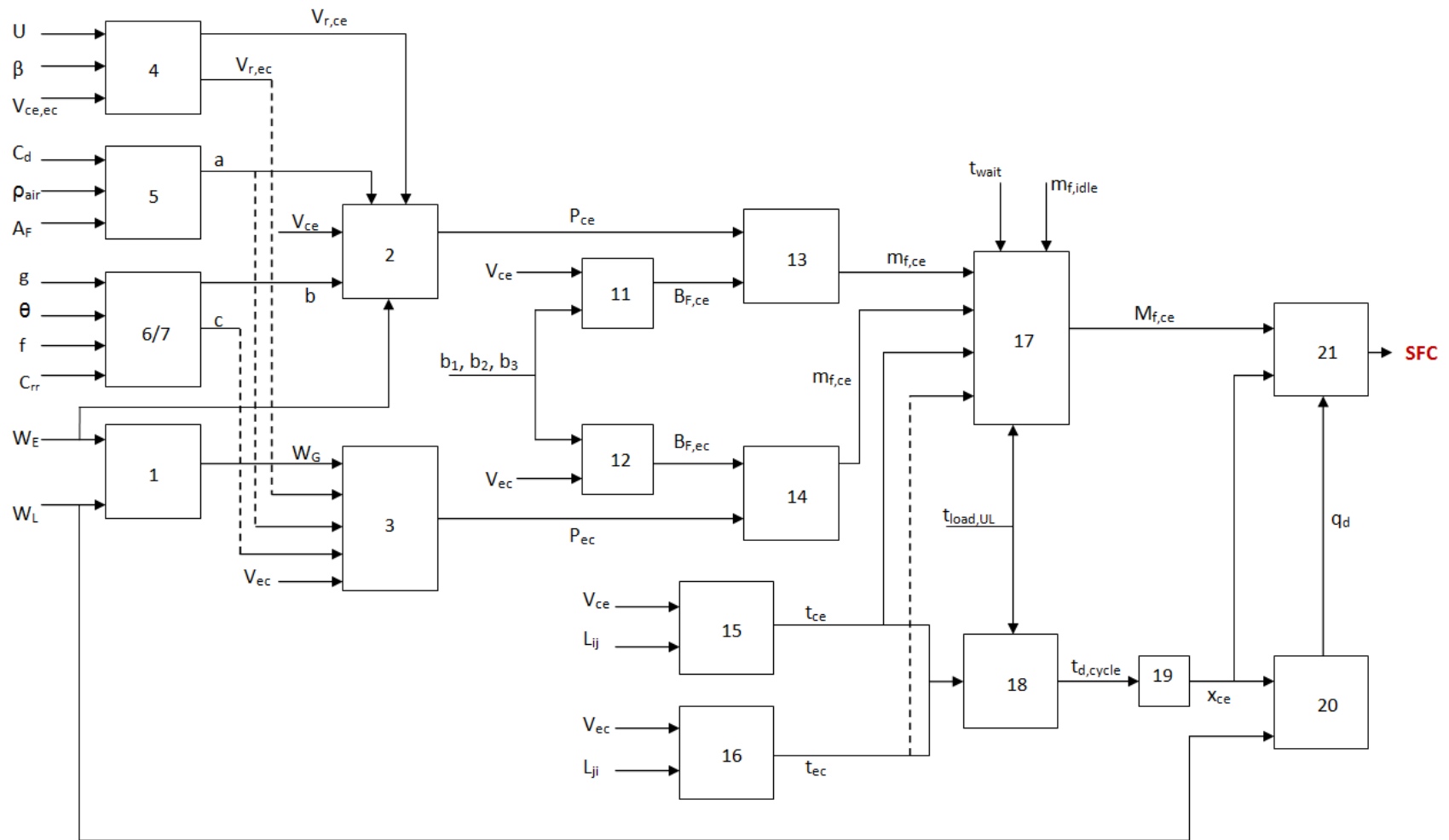


Figura 4: Diagrama de flujo para el cálculo del SFC (Fuente propia)



3.2. Procedimiento de cálculo

Para todos los cálculos se utilizará la herramienta Solver de Excel, que permite optimizar el valor de una fórmula, modificando las variables que se deseen y fijando las restricciones que se estimen oportunas. Se harán 3 tipos de cálculo:

- En primer lugar, el cálculo de la velocidad óptima de los camiones en la mina, a partir de unos requisitos de manejo de material extraídos de datos reales de la mina.
- A continuación, se calculará el SFC para cada trayecto de la mina.
- Por último, se hallará el número de camiones que se necesitarán en cada excavadora para satisfacer la demanda de material.

3.2.1. Cálculo de la velocidad óptima

Para el cálculo de la velocidad óptima de los camiones se utilizarán las ecuaciones comprendidas entre la [1] y la [21], introduciendo los datos pertinentes, y contando con los requisitos de demanda de la planta:

- En la interfaz Solver, se definirá como celda objetivo la celda correspondiente a la fórmula del SFC, indicando que se busca el valor mínimo.
- Como valores a modificar, se seleccionarán las celdas correspondientes a las velocidades, V_{ce} y V_{ec} .
- Como restricción, se requerirá que el valor de la producción horaria del camión sea como mínimo la indicada en los datos reales de la mina.

Hecho esto, el programa hará los cálculos pertinentes y, si tiene solución, devolverá el valor mínimo de SFC en la celda objetivo, y en las celdas de velocidad se reflejarán las velocidades óptimas.

3.2.2. Cálculo del SFC para las diferentes rutas

Una vez hallada la velocidad óptima de los camiones, se aplica para todas las rutas que existen en la mina. Cada ruta tiene una longitud y una carga del camión propias, que variarán el consumo del camión.



Para obtener el SFC en cada ruta, se modifican en la hoja de cálculo los valores de distancia y carga del camión. De esta forma se obtienen los valores del SFC de cada uno de los trayectos.

3.2.3. Cálculo del número de camiones para satisfacer la demanda de la excavadora para cada ruta

En este caso, se utilizan las ecuaciones [22] – [29]. Con las velocidades óptimas ya calculadas, se aplican las fórmulas, calculando el nuevo SFC dependiente del número de camiones.

Se calculan las nuevas variables y se introducen en el cálculo del nuevo SFC. Mediante el Solver, se selecciona el SFC global como celda objetivo, dejando fijas las velocidades y variando el número de camiones para que se cumplan las restricciones fijadas en las ecuaciones [25] – [27]. Al resolver, se obtendrá el SFC mínimo y el número de camiones.

El número de camiones debe ser una variable entera, por lo que si el resultado sale decimal, se debe escoger el número de camiones entero inmediatamente inferior o superior; si se escoge el número superior, los camiones van a estar parados cierto tiempo, que debe ser calculado. Este tiempo de parada afectará al consumo, por lo que se recalculará. Así, se obtiene el SFC de cada ruta cuando se satisface la demanda de la excavadora.



4. REALIZACIÓN DE LOS CÁLCULOS

4.1. Datos previos

Los cálculos se realizarán para una mina de caliza en Rajasthan (India). La mina en cuestión es de pendiente descendente (los camiones descienden cuando van cargados).

La instalación tiene una capacidad de 11,4 millones de toneladas de material al año, y su demanda anual es de 10,4 millones de toneladas (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014). El tiempo de operación es de 4000 horas al año, deduciéndose una demanda horaria de hasta 2600 t/h.

En cuanto a los datos topográficos, la mina tiene una extensión de 7,5 km², con distancias de trayecto entre excavadoras y molinos comprendidas entre 1,45 y 1,8 km. Como se mencionó al inicio, la mina es de pendiente descendente, con una inclinación de 1/14. Estos datos se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 2: Datos de operación y topográficos de la mina (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)

Mina de caliza de pendiente descendente	
Capacidad instalada	11,4 millones de t
Demanda de material	10,4 millones de t
Horas de operación	4000 horas/año
Tiempo de carga	3,5 min
Tiempo de descarga	0,5 min
Área de la mina	6,5 km ²
Distancia mínima	1,45 km
Distancia máxima	1,8 km
Pendiente de la mina	1/14

La mina cuenta con una serie de camiones, de excavadoras y de molinos, de los que solo operan un cierto número. Los camiones seleccionados para el trabajo, que son diferentes a los utilizados en la realidad, son de la marca Caterpillar, y sus datos fueron



obtenidos tras acudir a las instalaciones y recabar información acerca de los modelos disponibles. Los elegidos fueron los camiones 773G y 775 G, que eran los que más se asemejaban la operación real de la mina, con unas capacidades máximas de 60,8 y 70,3 toneladas, respectivamente (Caterpillar, 2012) (Caterpillar, 2012).

Los datos generales del equipamiento, tanto de capacidad como de equipos disponibles y equipos en operación, se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 3: Datos generales del equipamiento de la mina (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014) (Caterpillar, 2012) (Caterpillar, 2012)

Tipo de equipamiento	Capacidad máxima	Unidades disponibles	Unidades en operación
Excavadoras	1200 t/h	5	3
Molinos	1300 t/h	2	2
Camiones	60,8 t	12	5
	70,3 t	10	5

Para el cálculo también se requieren datos más específicos de los camiones, referidos a sus características del motor (potencia, par, régimen de giro) y a los parámetros físicos (masa del camión vacío, carga máxima, área frontal, relación de cambio, características de los neumáticos), indicados en la tabla que sigue:

Tabla 4: Parámetros del motor y físicos de los camiones (Caterpillar, 2012) (Caterpillar, 2012) (Caterpillar, 2016) (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014) (Eurotire, Inc.)

Características de los camiones	
Potencia máxima	596,5 kW @ 2100 rpm
Par máximo	3642 N·m @ 1400 rpm
Masa en vacío	41,5 t
Carga máxima	60,8 t, 70,3 t
Masa bruta	102,3 t, 111,8 t
Consumo al ralentí	4,67 kg/h
Relación de transmisión	17,49
Área frontal	16,64 m ²
Coefficiente de resistencia al avance	0,8
Coefficiente de fricción entre neumático y pavimento	0,035
Coefficiente de resistencia a la rodadura	0,006
Radio del neumático	1,085 m



Por último se calculan los coeficientes de las ecuaciones de potencia entregada por el motor y de consumo específico al freno, a partir de datos reales de funcionamiento (Caterpillar, 2016) y haciendo el ajuste cuadrático. Así, se obtienen las curvas en función de la velocidad del camión, aplicando la ecuación [8] al régimen de giro del motor:

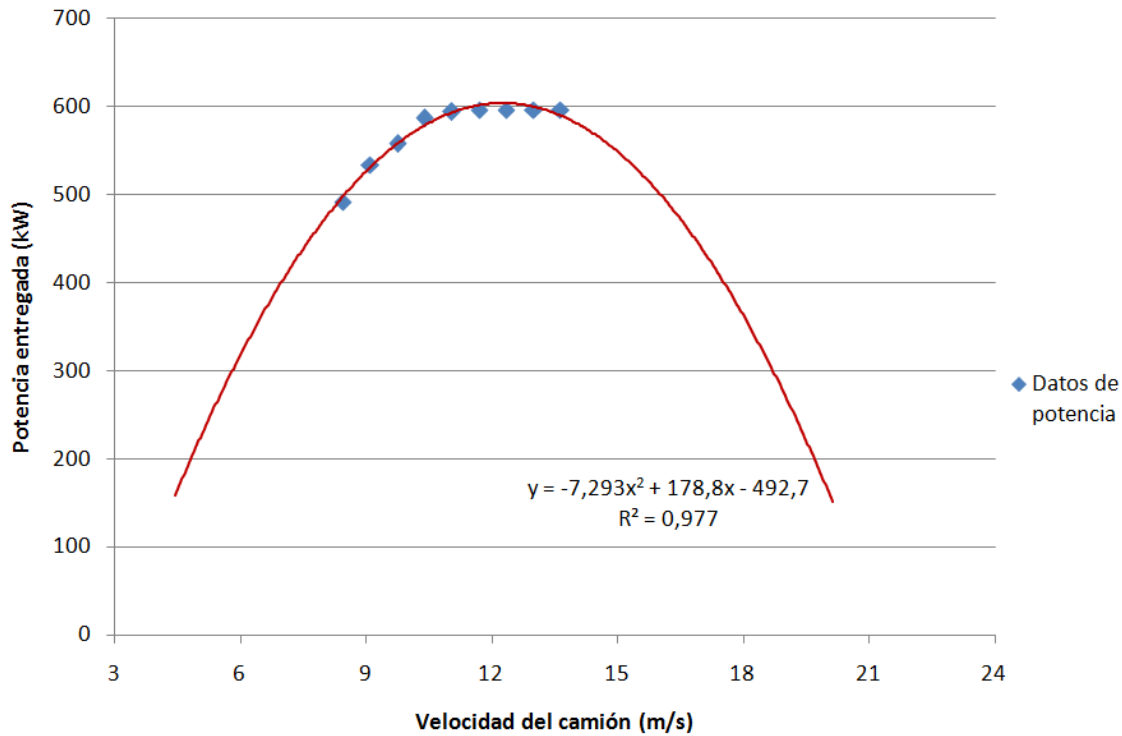


Figura 5: Curva de potencia del motor de los camiones (Fuente propia)

De la ecuación de ajuste se obtienen los coeficientes a_1 , a_2 y a_3 . Actuando análogamente para el consumo específico al freno:

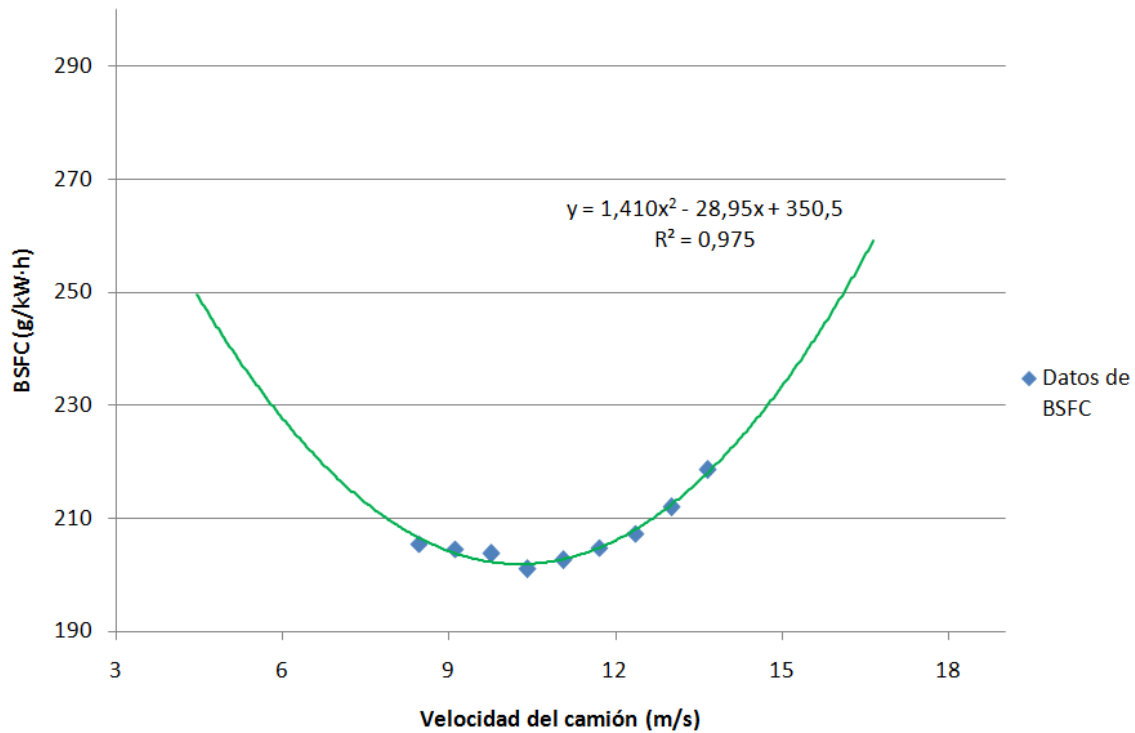


Figura 6: Curva de consumo específico al freno (Fuente propia)

Obteniéndose así los coeficientes b_1 , b_2 y b_3 .

4.2. Disposición en planta del equipamiento en la mina

Como se indicaba en anteriores apartados, los camiones deben realizar trayectos entre las excavadoras y los molinos.

Dado que hay 2 molinos y 3 excavadoras en operación, y teniendo en cuenta la red de transporte que actualmente está establecida en la mina (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014), la disposición de los equipos en la mina es la siguiente:

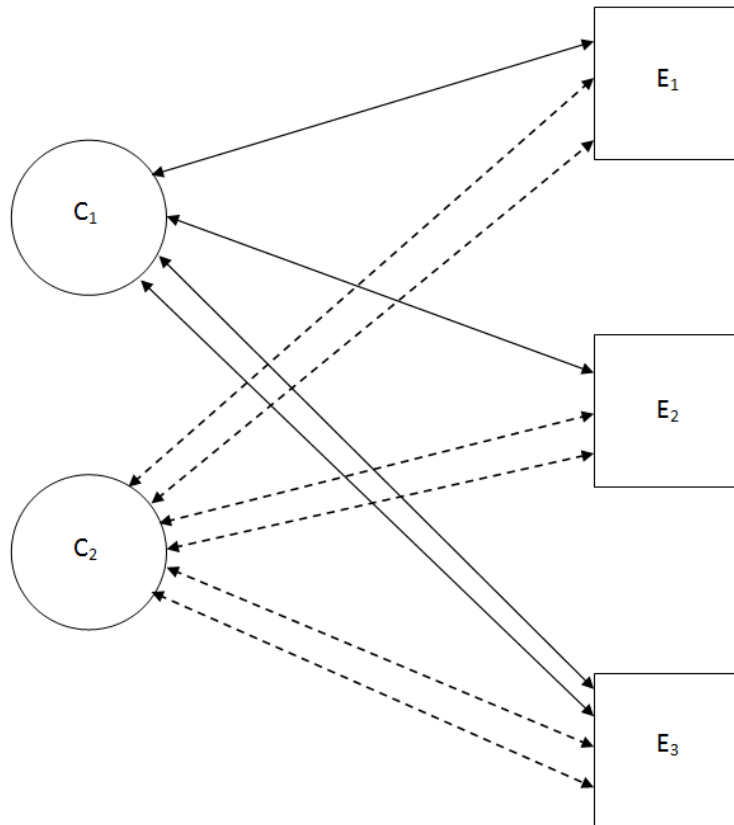


Figura 7: Esquema con la disposición actual del equipamiento de la mina (Fuente propia)

Como se puede observar, existen 6 rutas diferentes, con distintas longitudes y distintas cargas en el camión. En algunas de ellas, según la distribución actual, operan 2 camiones. Todos los datos de las rutas se incluyen en la tabla que sigue:

Tabla 5: Características de las rutas actuales y carga a utilizar para el cálculo (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)

Trayecto (C-E)	Longitud (km)	Carga actual del camión (t)	Nº actual de camiones	Carga de camión para el cálculo (t)
1-1	1,45	52	1	60,8
1-2	1,5	65	1	70,3
1-3	1,6	65	2	70,3
2-1	1,65	65	2	70,3
2-2	1,7	52	2	60,8
2-3	1,8	52	2	60,8



A colación de los datos recogidos en la tabla anterior, cabe destacar que a pesar de variar el tonelaje de los camiones, se mantiene para el cálculo el camión más ligero en las mismas rutas que las actuales.

De aquí en adelante se detallan los cálculos realizados.

4.3. Cálculo de las velocidades óptimas

Para el cálculo de las velocidades óptimas se utiliza una restricción procedente de los datos de campo.

De los datos reales de producción de la mina, se sabe que en la ruta C₁-E₂ la demanda de material por camión debe ser de 360 t/h (Banerjee, 2016). Utilizando el Solver para minimizar la celda del SFC en la ruta C₁-E₂, e introduciendo la restricción de la producción horaria, tal y como se observa en la siguiente figura:

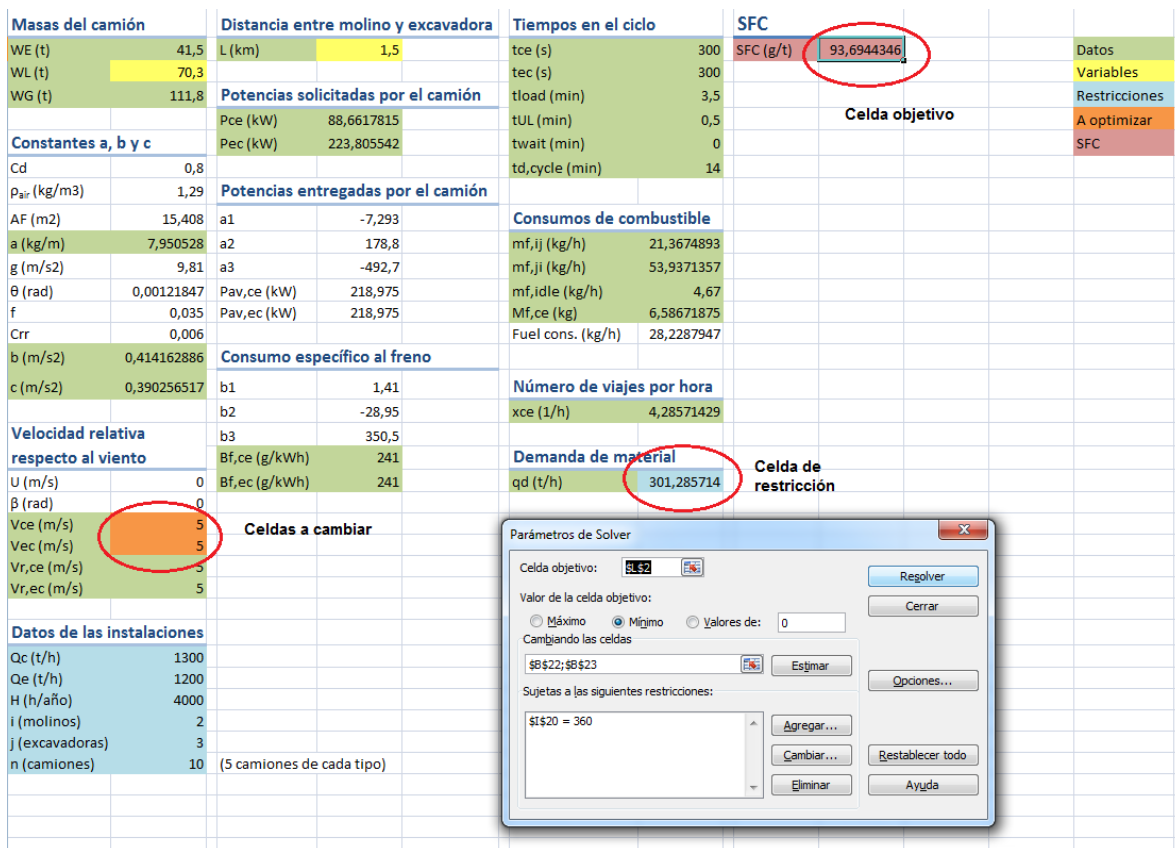


Figura 8: Introducción de las condiciones para el cálculo de las velocidades óptimas (Fuente propia)



Se obtienen las velocidades óptimas de tránsito, tanto para el trayecto cargado como para el trayecto sin carga:

Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC		
WE (t)	41,5	L (km)	1,5	tce (s)	286,498022	SFC (g/t)	86,8154018	Datos
WL (t)	70,3	Potencias solicitadas por el camión		tec (s)	176,501978			Variables
WG (t)	111,8	Pce (kW)	93,1152866	tload (min)	3,5			Restricciones
Constantes a, b y c		Pec (kW)	398,549011	tUL (min)	0,5			A optimizar
Cd	0,8	Potencias entregadas por el camión		twait (min)	0			SFC
ρ_{air} (kg/m ³)	1,29	a1	-7,293	td,cycle (min)	11,7166667			
AF (m ²)	15,408	a2	178,8	Consumos de combustible				
a (kg/m)	7,950528	a3	-492,7	mf,ij (kg/h)	22,1222425			
g (m/s ²)	9,81	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,ji (kg/h)	82,2226661			
θ (rad)	0,00121847	Pav,ec (kW)	500,097866	mf,idle (kg/h)	4,67			
f	0,035	Consumo específico al freno		Mf,ce (kg)	6,10312275			
Crr	0,006	b1	1,41	Fuel cons. (kg/h)	31,2535447			
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95	Número de viajes por hora				
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	xce (1/h)	5,12091038			
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	Demanda de material				
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	qd (t/h)	360			
β (rad)	0	Datos de las instalaciones						
Vce (m/s)	5,235638234	18,84829764						
Vec (m/s)	8,498488351	30,59455806						
Vr,ce (m/s)	5,235638234							
Vr,ec (m/s)	8,498488351							
Qc (t/h)	1300							
Qe (t/h)	1200							
H (h/año)	4000							
i (molinos)	2							
j (excavadoras)	3							
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)						

Figura 9: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo de las velocidades óptimas (Fuente propia)

El resultado se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 6: Resultados del cálculo de las velocidades óptimas (Fuente propia)

V_{ce} óptima	18,85 km/h (= 5,24 m/s)
V_{ec} óptima	30,6 km/h (= 8,5 m/s)
SFC	86,8 g/t

4.4. Cálculo del SFC para las diferentes rutas

Las velocidades que se acaban de calcular serán las que se tomen de ahora en adelante en todas las rutas. Sabido esto, se procede al cálculo del SFC en el resto de rutas, utilizando dichas velocidades.



Se modifican los datos en la hoja de cálculo para cada ruta en función de lo expuesto en la Tabla 5, y dejan como velocidades las óptimas. Los SFC hallados son los de cada ruta para la velocidad óptima.

4.4.1. Ruta C₁-E₁

En esta ruta la distancia es de 1,45 km, y el camión es el más ligero, con una carga de 60,8 t. Los resultados obtenidos se observan en la siguiente figura:

Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC		
WE (t)	41,5	L (km)	1,45	tce (s)	276,948088	SFC (g/t)	91,9621182	Datos
WL (t)	60,8			tec (s)	170,618578			Variables
WG (t)	102,3	Potencias solicitadas por el camión		tload (min)	3,5			Restricciones
		Pce (kW)	93,1837467	tUL (min)	0,5			Velocidad
		Pec (kW)	365,81945	twait (min)	0			SFC
				td,cycle (min)	11,4594444			
Constantes a, b y c		Potencias entregadas por el camión		Consumos de combustible				
Cd	0,8	a1	-7,293	mf,ij (kg/h)	22,1385072			
ρ _{air} (kg/m ³)	1,29	a2	178,8	mf,ji (kg/h)	75,4703932			
AF (m ²)	15,408	a3	-492,7	mf,idle (kg/h)	4,67			
a (kg/m)	7,950528	Pav,ce (kW)	243,517073	Mf,ce (kg)	5,59129679			
g (m/s ²)	9,81	Pav,ec (kW)	500,097866	Fuel cons. (kg/h)	29,2752244			
θ (rad)	0,00121847							
f	0,035	Consumo específico al freno		Número de viajes por hora				
Crr	0,006	b1	1,41	xce (1/h)	5,23585592			
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95					
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	Demanda de material				
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	qd (t/h)	318,34004			
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031					
β (rad)	0							
Vce (m/s)	5,235638234							
Vec (m/s)	8,498488351							
Vr,ce (m/s)	5,235638234							
Vr,ec (m/s)	8,498488351							
Datos de las instalaciones								
Qc (t/h)	1300							
Qe (t/h)	1200							
H (h/año)	4000							
i (molinos)	2							
j (excavadoras)	3							
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)						

Figura 10: Hoja de cálculo con los resultados del SFC en la ruta C₁-E₁ (Fuente propia)

Y en la siguiente tabla, donde también figura el consumo horario de combustible en cada ciclo (se halla dividiendo el consumo total por ciclo entre el tiempo de ciclo):



Tabla 7: Resultados para la ruta C1-E1 (Fuente propia)

SFC	91,96 g/t
Demanda de material	318,3 t/h
Consumo de combustible	29,28 kg/h

4.4.2. Ruta C₁-E₂

Esta es la ruta para la que se calcularon las velocidades óptimas, por lo que no es necesario ningún cálculo. Los resultados son:

Tabla 8: Resultados para la ruta C1-E2 (Fuente propia)

SFC	86,8 g/t
Demanda de material	360 t/h
Consumo de combustible	31,25 kg/h

4.4.3. Ruta C₁-E₃

Esta ruta tiene una distancia de 1,6 km. En ella se utilizan camiones de 70,3 toneladas de carga, con los que se obtienen los resultados recogidos en la figura que sigue:



Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC		
WE (t)	41,5	L (km)	1,6	tce (s)	305,597891	SFC (g/t)	92,0528457	Datos
WL (t)	70,3			tec (s)	188,268776			Variables
WG (t)	111,8	Potencias solicitadas por el camión		tload (min)	3,5			Restricciones
Constantes a, b y c		Pce (kW)	92,9912026	tUL (min)	0,5			A optimizar
Cd	0,8	Pec (kW)	397,119374	twait (min)	0			SFC
ρ_{air} (kg/m ³)	1,29	Potencias entregadas por el camión		td,cycle (min)	12,2311111			
AF (m ²)	15,408	a1	-7,293	Consumos de combustible				
a (kg/m)	7,950528	a2	178,8	mf,ij (kg/h)	22,0927628			
g (m/s ²)	9,81	a3	-492,7	mf,ji (kg/h)	81,9277249			
θ (rad)	0,00121847	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,idle (kg/h)	4,67			
f	0,035	Pav,ec (kW)	500,097866	Mf,ce (kg)	6,47131505			
Crr	0,006	Consumo específico al freno		Fuel cons. (kg/h)	31,7451865			
b (m/s ²)	0,414162886	b1	1,41	Número de viajes por hora				
c (m/s ²)	0,390256517	b2	-28,95	xce (1/h)	4,90552326			
Velocidad relativa respecto al viento		b3	350,5	Demanda de material				
U (m/s)	0	Bf,ce (g/kWh)	237,579063	qd (t/h)	344,858285			
β (rad)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031					
Vce (m/s)	5,235638234							
Vec (m/s)	8,498488351							
Vr,ce (m/s)	5,235638234							
Vr,ec (m/s)	8,498488351							
Datos de las instalaciones								
Qc (t/h)	1300							
Qe (t/h)	1200							
H (h/año)	4000							
i (molinos)	2							
j (excavadoras)	3							
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)						

Figura 11 : Hoja de cálculo con los resultados del SFC en la ruta C1-E3 (Fuente propia)

Y en esta tabla:

Tabla 9: Resultados para la ruta C1-E3 (Fuente propia)

SFC	92,1 g/t
Demanda de material	344,9 t/h
Consumo de combustible	31,75 kg/h

4.4.4. Ruta C₂-E₁

Análogamente a los casos anteriores, para una distancia de 1,65 km y una carga de 70,3 toneladas por camión, los resultados fueron los que se reflejan a continuación:



Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC		
WE (t)	41,5	L (km)	1,65	tce (s)	315,147825	SFC (g/t)	94,6715676	Datos
WL (t)	70,3	Potencias solicitadas por el camión		tec (s)	194,152175			Variables
WG (t)	111,8	Pce (kW)	92,9348007	tload (min)	3,5			Restricciones
Constantes a, b y c		Pec (kW)	396,469539	tUL (min)	0,5			A optimizar
Cd	0,8	Potencias entregadas por el camión		twait (min)	0			SFC
ρ_{air} (kg/m ³)	1,29	a1	-7,293	td,cycle (min)	12,4883333			
AF (m ²)	15,408	a2	178,8	Consumos de combustible				
a (kg/m)	7,950528	a3	-492,7	mf,ij (kg/h)	22,0793629			
g (m/s ²)	9,81	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,ji (kg/h)	81,7936607			
θ (rad)	0,00121847	Pav,ec (kW)	500,097866	mf,idle (kg/h)	4,67			
f	0,035	Consumo específico al freno		Mf,ce (kg)	6,6554112			
Crr	0,006	b1	1,41	Fuel cons. (kg/h)	31,9758179			
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95	Número de viajes por hora				
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	xce (1/h)	4,80448419			
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	Demanda de material				
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	qd (t/h)	337,755238			
β (rad)	0							
Vce (m/s)	5,235638234							
Vec (m/s)	8,498488351							
Vr,ce (m/s)	5,235638234							
Vr,ec (m/s)	8,498488351							
Datos de las instalaciones								
Qc (t/h)	1300							
Qe (t/h)	1200							
H (h/año)	4000							
i (molinos)	2							
j (excavadoras)	3							
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)						

Figura 12: Hoja de cálculo con los resultados de SFC en la ruta C2-E1 (Fuente propia)

El resumen de los cálculos viene reflejado en la tabla siguiente:

Tabla 10: Resultados para la ruta C2-E1 (Fuente propia)

SFC	94,7 g/t
Demanda de material	337,8 t/h
Consumo de combustible	31,96 kg/h

4.4.5. Ruta C₂-E₂

Esta ruta tiene una distancia de 1,7 km, y los camiones acarrear una carga de 60,8 toneladas. Sabido esto, los resultados obtenidos son los que siguen:



Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC		
WE (t)	41,5	L (km)	1,7	tce (s)	324,697759	SFC (g/t)	106,227995	Datos
WL (t)	60,8	Potencias solicitadas por el camión		tec (s)	200,035575			Variables
WG (t)	102,3	Pce (kW)	92,8817167	tload (min)	3,5			Restricciones
Constantes a, b y c		Pec (kW)	362,635299	tUL (min)	0,5			A optimizar
Cd	0,8	Potencias entregadas por el camión		twait (min)	0			SFC
ρ_{air} (kg/m ³)	1,29	a1	-7,293	td,cycle (min)	12,7455556			
AF (m ²)	15,408	a2	178,8	Consumos de combustible				
a (kg/m)	7,950528	a3	-492,7	mf,ij (kg/h)	22,0667512			
g (m/s ²)	9,81	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,ji (kg/h)	74,8134866			
θ (rad)	0,00121847	Pav,ec (kW)	500,097866	mf,idle (kg/h)	4,67			
f	0,035	Consumo específico al freno		Mf,ce (kg)	6,45866207			
Crr	0,006	b1	1,41	Fuel cons. (kg/h)	30,4043023			
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95	Número de viajes por hora				
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	xce (1/h)	4,70752332			
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	Demanda de material				
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	qd (t/h)	286,217418			
β (rad)	0							
Vce (m/s)	5,235638234							
Vec (m/s)	8,498488351							
Vr,ce (m/s)	5,235638234							
Vr,ec (m/s)	8,498488351							
Datos de las instalaciones								
Qc (t/h)	1300							
Qe (t/h)	1200							
H (h/año)	4000							
i (molinos)	2							
j (excavadoras)	3							
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)						

Figura 13: Hoja de cálculo con los resultados de SFC en la ruta C2-E2 (Fuente propia)

La tabla siguiente contiene los datos más importantes del cálculo:

Tabla 11: Resultados para la ruta C2-E2 (Fuente propia)

SFC	106,2 g/t
Demanda de material	286,2 t/h
Consumo de combustible	30,4 kg/h

4.4.6. Ruta C₂-E₃

Por último, se calcula el SFC para una distancia de 1,8 km, donde los camiones tienen una carga máxima de 60,8 toneladas. Así:



Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC	
WE (t)	41,5	L (km)	1,8	tce (s)	343,797627	SFC (g/t)	111,934345
WL (t)	60,8	Potencias solicitadas por el camión		tec (s)	211,802373		
WG (t)	102,3	Pce (kW)	92,7843959	tload (min)	3,5		
Constantes a, b y c		Pec (kW)	361,609294	tUL (min)	0,5		
Cd	0,8	Potencias entregadas por el camión		twait (min)	0		
ρ_{air} (kg/m ³)	1,29	a1	-7,293	td,cycle (min)	13,26		
AF (m ²)	15,408	a2	178,8	Consumos de combustible			
a (kg/m)	7,950528	a3	-492,7	mf,ij (kg/h)	22,0436298		
g (m/s ²)	9,81	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,ji (kg/h)	74,6018167		
θ (rad)	0,00121847	Pav,ec (kW)	500,097866	mf,idle (kg/h)	4,67		
f	0,035	Consumo específico al freno		Mf,ce (kg)	6,80560818		
Crr	0,006	b1	1,41	Fuel cons. (kg/h)	30,7946071		
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95	Número de viajes por hora			
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	xce (1/h)	4,52488688		
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	Demanda de material			
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	qd (t/h)	275,113122		
β (rad)	0						
Vce (m/s)	5,235638234						
Vec (m/s)	8,498488351						
Vr,ce (m/s)	5,235638234						
Vr,ec (m/s)	8,498488351						
Datos de las instalaciones							
Qc (t/h)	1300						
Qe (t/h)	1200						
H (h/año)	4000						
i (molinos)	2						
j (excavadoras)	3						
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)					

Figura 14: Hoja de cálculo con los resultados de SFC en la ruta C2-E3 (Fuente propia)

Los resultados vienen resumidos, al igual que en todos los casos anteriores, en una tabla:

Tabla 12: Resultados para la ruta C2-E3 (Fuente propia)

SFC	111,9 g/t
Demanda de material	275,1 t/h
Consumo de combustible	30,79 kg/h



4.5. Cálculo del número de camiones para satisfacer la demanda de la excavadora para cada ruta

Se introducen para el cálculo las ecuaciones [22] - [29], manteniendo siempre las velocidades óptimas calculadas anteriormente.

Para el cálculo con el Solver, se introducen nuevas celdas con las fórmulas de las ecuaciones utilizadas en este paso. Así, la hoja de cálculo queda, previamente a cualquier tipo de cálculo, como se ve en la siguiente figura:

Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC		
WE (t)	41,5	L (km)	1,45	tce (s)	276,948088	SFC (g/t)	91,9621182	Datos
WL (t)	60,8			tec (s)	170,618578			Variables
WG (t)	102,3	Potencias solicitadas por el camión		tload (min)	3,5	Restricciones		Restricciones
		Pce (kW)	93,1837467	tUL (min)	0,5	Di (t/h)	1114 (para H=1)	Velocidad
Constantes a, b y c		Pec (kW)	365,81945	twait (min)	0	Xij-WL-H	985,085568	SFC
Cd	0,8	Potencias entregadas por el camión		td,cycle (min)	11,4594444	Xij-WL	985,085568	
ρ_{air} (kg/m ³)	1,29	a1	-7,293	Consumos de combustible		SFC global		
AF (m ²)	15,408	a2	178,8	mf,ij (kg/h)	22,1385072	SFCg (g/t)	91,9621182	
a (kg/m)	7,950528	a3	-492,7	mf,ji (kg/h)	75,4703932			
g (m/s ²)	9,81	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,idle (kg/h)	4,67			
θ (rad)	0,00121847	Pav,ec (kW)	500,097866	Mf,ce (kg)	5,59129679			
f	0,035	Consumo específico al freno		Fuel cons. (kg/h)	29,2752244			
Crr	0,006	b1	1,41	Número de viajes por hora				
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95	xce (1/h)	5,23585592			
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	nd	3,09444445			
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	Xij (1/h)	16,2020653			
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	Demanda de material				
β (rad)	0			qd (t/h)	318,34004			
Vce (m/s)	5,235638234							
Vec (m/s)	8,498488351							
Vr,ce (m/s)	5,235638234							
Vr,ec (m/s)	8,498488351							
Datos de las instalaciones								
Qc (t/h)	1300							
Qe (t/h)	1200							
H (h/año)	4000							
i (molinos)	2							
j (excavadoras)	3							
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)						

Figura 15: Aspecto de la hoja de cálculo con las nuevas variables (Fuente propia)

Una vez hecho esto, se ejecuta la extensión Solver y se introducen los datos necesarios. Debe elegirse como celda a minimizar el SFC global, y debe establecerse como dato a variar el número de camiones. Como restricciones, se introducen las ecuaciones [25] – [27], que no deben superar los valores de capacidad de excavadoras y molinos. Además, debe tratar de alcanzarse la demanda real en cada excavadora. Esta demanda se conoce gracias a datos de operación, y es de 1114 t/h (Banerjee, 2016).



4.5.1. Ruta C₁-E₁

Conocidos todos estos datos, se procede a implementarlo en la herramienta Solver. En la siguiente imagen se puede ver la interfaz con los datos de entrada correspondientes a la ruta C₁-E₁:

Masas del camión	Distancia entre molino y excavadora	Tiempos en el ciclo	SFC	
WE (t) 41,5	L (km) 1,45	tce (s) 276,948088	SFC (g/t) 91,9621182	Datos
WL (t) 60,8		tec (s) 170,618578		Variables
WG (t) 102,3		tload (min) 3,5		Restricciones
	Potencias solicitadas por el camión	tUL (min) 0,5	Restricciones	Restricción
	Pce (kW) 93,1837467	twait (min)	DI (t/h) 1114 (para H=1)	
	Pec (kW) 365,81945	td,cycle (min) 11,4594444	Xij-WL-H 985,085568	
			Xij-WL 985,085568	Celdas que deben cumplir las restricciones
Constantes a, b y c	Potencias entregadas por el camión			
Cd 0,8	a1 -7,293	Consumos de combustible	SFC global	
ρ _{air} (kg/m ³) 1,29	a2 178,8	mf,ij (kg/h) 22,1385072	SFCg (g/t) 91,9621182	Celda a minimizar
AF (m ²) 15,408	a3 -492,7	mf,ji (kg/h) 75,4703932		
a (kg/m) 7,950528	Pav,ce (kW) 243,517073	mf,idle (kg/h) 4,67		
g (m/s ²) 9,81	Pav,ec (kW) 500,097866	Mf,ce (kg) 5,59129679		
θ (rad) 0,00121847		Fuel cons. (kg/h) 29,2752244		
f 0,035	Consumo específico al freno			
Crr 0,006	b1 1,41	Número de viajes por hora		
b (m/s ²) 0,414162886	b2 -28,95	xce (1/h) 5,23565592		
c (m/s ²) 0,390256517	b3 350,5	nd 3,09444445		Celda que se cambia
	Bf,ce (g/kWh) 237,579063	Xij (1/h) 16,2020653		
Velocidad relativa respecto al viento	Bf,ec (g/kWh) 206,305031			
U (m/s) 0		Demanda de material		
β (rad) 0		qd (t/h) 318,34004		
Vce (m/s) 5,235638234				
Vec (m/s) 8,498488351				
Vr,ce (m/s) 5,235638234				
Vr,ec (m/s) 8,498488351				
Datos de las instalaciones	Restricciones			
Qc (t/h) 1300	(5 camiones de cada tipo)			
Qe (t/h) 1200				
H (h/año) 4000				
i (molinos) 2				
j (excavadoras) 3				
n (camiones) 10				

Parámetros de Solver

Celda objetivo:

Valor de la celda objetivo: Máximo Mínimo Valores de:

Cambiando las celdas

Sujetas a las siguientes restricciones:

\$L\$6 >= \$L\$5

\$L\$7 <= \$B\$28

\$L\$7 <= \$B\$29

Figura 16: Hoja de cálculo explicativa de la ejecución del Solver para el cálculo del nº de camiones (Fuente propia)

Así, ejecutando, se obtienen un número de camiones igual a 3,6205. Como ya se mencionó, el número de camiones debe ser una variable entera. Por tanto debe decidirse si se utilizan 3 o se utilizan 4.

Utilizando 3 camiones, el manejo de material sería de 955 t/h, valor que está bastante alejado de la demanda de 1114 t/h, por lo que se decide utilizar 4 camiones en esta ruta.



Al utilizar más camiones del número ideal, va a haber un tiempo de espera de los camiones antes de cargar, lo que va a afectar al consumo. Este tiempo de espera se calcula con la ecuación [28], y se introduce en la [29] para ver el efecto sobre el consumo y los demás valores

Con 4 camiones, pues, los datos son los que se reflejan en la siguiente figura:

Masas del camión	Distancia entre molino y excavadora	Tiempos óptimos en el ciclo	SFC		
WE (t) 41,5	L (km) 1,45	tce (s) 276,948088	SFC (g/t) 91,9621182		Datos
WL (t) 60,8		tec (s) 170,618578			Variables
WG (t) 102,3		tload (min) 3,5			Restricciones
	Potencias solicitadas por el camión	tUL (min) 0,5			Velocidad
	Pce (kW) 93,1837467	twait (min) 0	Di (t/h) 1114 (para H=1)		SFC
Constantes a, b y c	Pec (kW) 365,81945	td,cycle (min) 11,4594444	Xij-WL-H 1273,36016		Nuevos valores
Cd 0,8			Xij-WL 1273,36016		
ρ_{air} (kg/m ³) 1,29	Potencias entregadas por el camión				
AF (m ²) 15,408	a1 -7,293	Consumos de combustible	Tiempo de espera y nuevos valores		
a (kg/m) 7,950528	a2 178,8	mf,ij (kg/h) 22,1385072	twait (min) 2,5405556		
g (m/s ²) 9,81	a3 -492,7	mf,ji (kg/h) 75,4703932	td,cycle (min) 14		
θ (rad) 0,00121847	Pav,ce (kW) 243,517073	mf,idle (kg/h) 4,67	Mf,ce (kg) 5,7890367		
f 0,035	Pav,ec (kW) 500,097866	Mf,ce (kg) 5,59129679	Fuel cons. (kg/h) 24,8101573		Conjunto de nuevos valores en función del tiempo de espera hallado
Crr 0,006		Fuel cons. (kg/h) 29,2752244	xce (1/h) 4,28571429		
b (m/s ²) 0,414162886	Consumo específico al freno		Xij (1/h) 17,1428571		
c (m/s ²) 0,390256517	b1 1,41	Número de viajes por hora	qd (t/h) 260,571429		
	b2 -28,95	xce (1/h) 5,23585595	Xij-WL-H 1042,28571		
Velocidad relativa respecto al viento	b3 350,5	nd 4	Xij-WL 1042,28571		
U (m/s) 0	Bf,ce (g/kWh) 237,579063	Xij (1/h) 20,943237			
β (rad) 0	Bf,ec (g/kWh) 206,305031	Nº de camiones modificado	SFC global		
Vce (m/s) 5,235638234		Demanda de material	SFCg (g/t) 95,2144193		Nuevo SFC global
Vec (m/s) 8,498488351		qd (t/h) 318,34004			
Vr,ce (m/s) 5,235638234					
Vr,ec (m/s) 8,498488351					
Datos de las instalaciones					
Qc (t/h) 1300					
Qe (t/h) 1200					
H (h/año) 4000					
i (molinos) 2					
j (excavadoras) 3					
n (camiones) 10	(5 camiones de cada tipo)				

Figura 17: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones para la ruta C1-E1 (Fuente propia)

Se observa que la nueva demanda de material es de 1042 t/h, que se aproxima más a las 1114 t/h y se puede dar por buena. El nuevo SFC resulta ser de 95,2 g/t.

Los datos obtenidos para esta ruta son los siguientes:



Tabla 13: Resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C1-E1 (Fuente propia)

SFC	95,2 g/t
Nº camiones	4
Producción	1042 t/h
Consumo de combustible	24,81 kg/h

4.5.2. Ruta C₁-E₂

Actuando análogamente para esta ruta, se obtienen un nº de camiones real de 3,09. Tomando 3 camiones, la producción pasa a ser de 1080 t/h, un valor muy próximo a las 1114 t/h y que se da como válido.

Así, al ser menor número de camiones utilizado que el ideal, no existe tiempo de espera, por lo que los valores son los mismos que para un solo camión:

Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC		
WE (t)	41,5	L (km)	1,5	tce (s)	286,498022	SFC (g/t)	86,8154018	Datos
WL (t)	70,3			tec (s)	176,501978			Variables
WG (t)	111,8	Potencias solicitadas por el camión		tload (min)	3,5	Restricciones		Restricciones
		Pce (kW)	93,1152866	tUL (min)	0,5	Di (t/h)	1114 (para H=1)	A optimizar
Constantes a, b y c		Pec (kW)	398,549011	twait (min)	0	Xij-WL-H	1080	SFC
Cd	0,8	Potencias entregadas por el camión		td,cycle (min)	11,7166667	Xij-WL	1080	
ρ_{air} (kg/m ³)	1,29	a1	-7,293	Consumos de combustible		SFC global		
AF (m2)	15,408	a2	178,8	mf,ij (kg/h)	22,1222425	SFCg (g/t)	86,8154018	
a (kg/m)	7,950528	a3	-492,7	mf,ji (kg/h)	82,2226661			
g (m/s ²)	9,81	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,idle (kg/h)	4,67			
θ (rad)	0,00121847	Pav,ec (kW)	500,097866	Mf,ce (kg)	6,10312275			
f	0,035	Consumo específico al freno		Fuel cons. (kg/h)	31,2535447			
Crr	0,006	b1	1,41	Número de viajes por hora				
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95	xce (1/h)	5,12091038			
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	nd	3			
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	Xij (1/h)	15,3627312			
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	Demanda de material				
β (rad)	0			qd (t/h)	360			
Vce (m/s)	5,235638234		18,84829764					
Vec (m/s)	8,498488351		30,59455806					
Vr,ce (m/s)	5,235638234							
Vr,ec (m/s)	8,498488351							
Datos de las instalaciones								
Qc (t/h)	1300							
Qe (t/h)	1200							
H (h/año)	4000							
i (molinos)	2							
j (excavadoras)	3							
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)						

Figura 18: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C1-E2 (Fuente propia)



La siguiente tabla resume los resultados para este trayecto:

Tabla 14: Resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C1-E2 (Fuente propia)

SFC	86.8 g/t
Nº camiones	3
Producción	1080 t/h
Consumo de combustible	31.25 kg/h

4.5.3. Ruta C₁-E₃

Si se optimiza el número de camiones para minimizar el SFC en esta ruta, resultan 3,25 camiones. Para 3 camiones la producción es de 1030 t/h, algo más alejada del valor que en otros casos que, aun no llegando a 1114 t/h, estaban más cerca. Por tanto se prueba a tomar 4 camiones.

Recalculando los valores para un número de camiones igual a 4, se obtienen los valores que figuran a continuación:



Masas del camión	Distancia entre molino y excavadora	Tiempos en el ciclo	SFC		
WE (t) 41,5	L (km) 1,6	tce (s) 305,597891	SFC (g/t) 92,0528457		Datos
WL (t) 70,3		tec (s) 188,268776			Variables
WG (t) 111,8	Potencias solicitadas por el camión	tload (min) 3,5	Restricciones		Restricciones
	Pce (kW) 92,9912026	tUL (min) 0,5	Di (t/h) 1114 (para H=1)		A optimizar
Constantes a, b y c	Pec (kW) 397,119374	twait (min) 0	Xij-WL-H 1379,43314		SFC
Cd 0,8		td,cycle (min) 12,2311111	Xij-WL 1379,43314		Nuevos valores
ρ_{air} (kg/m ³) 1,29	Potencias entregadas por el camión	Consumos de combustible	Tiempo de espera y nuevos valores		
AF (m ²) 15,408	a1 -7,293	mf,ij (kg/h) 22,0927628	twait (min) 1,76888889		
a (kg/m) 7,950528	a2 178,8	mf,ji (kg/h) 81,9277249	td,cycle (min) 14		
g (m/s ²) 9,81	a3 -492,7	mf,idle (kg/h) 4,67	Mf,ce (kg) 6,60899357		
θ (rad) 0,00121847	Pav,ce (kW) 243,517073	Mf,ce (kg) 6,47131505	Fuel cons. (kg/h) 28,3242582		
f 0,035	Pav,ec (kW) 500,097866	Fuel cons. (kg/h) 31,7451865	xce (1/h) 4,28571429		
Crr 0,006	Consumo específico al freno	Número de viajes por hora	Xij (1/h) 17,1428571		
b (m/s ²) 0,414162886	b1 1,41	xce (1/h) 4,90552326	qd (t/h) 301,285714		
c (m/s ²) 0,390256517	b2 -28,95	nd 4	Xij-WL-H 1205,14286		
Velocidad relativa respecto al viento	b3 350,5	Xij (1/h) 19,622093	Xij-WL 1205,14286		
U (m/s) 0	Bf,ce (g/kWh) 237,579063	Demanda de material	SFC global		
β (rad) 0	Bf,ec (g/kWh) 206,305031	qd (t/h) 344,858285	SFCg (g/t) 94,0112883		
Vce (m/s) 5,235638234					
Vec (m/s) 8,498488351					
Vr,ce (m/s) 5,235638234					
Vr,ec (m/s) 8,498488351					
Datos de las instalaciones					
Qc (t/h) 1300					
Qe (t/h) 1200					
H (h/año) 4000					
i (molinos) 2					
j (excavadoras) 3					
n (camiones) 10	(5 camiones de cada tipo)				

Figura 19: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C1-E3 (Fuente propia)

El valor de producción es de 1205 t/h, que es prácticamente igual al máximo de la excavadora, por lo que se da por válido. Resumiendo, los resultados son los que siguen:

Tabla 15: Resultados del cálculo del nº de camiones para la ruta C1-E3 (Fuente propia)

SFC	94 g/t
Nº camiones	4
Producción	1205 t/h
Consumo de combustible	28,32 kg/h

4.5.4. Ruta C₂-E₁

De igual forma que en otros casos, se calcula el número ideal de camiones que resulta ser de 3,4. Para 3 camiones la producción resulta ser de 1013 t/h, un valor suficientemente alejado de las 1114 t/h como para no considerarse válido.



Por tanto, se toman 4 camiones y se calcula el tiempo de espera de los camiones, con el que se recalcula todo lo demás. Los resultados obtenidos se reflejan en la siguiente figura:

Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC			
WE (t)	41,5	L (km)	1,65	tce (s)	315,147825	SFC (g/t)	94,6715676		Datos
WL (t)	70,3			tec (s)	194,152175				Variables
WG (t)	111,8	Potencias solicitadas por el camión		tload (min)	3,5	Restricciones			Restricciones
Constantes a, b y c		Pce (kW)	92,9348007	tUL (min)	0,5	Di (t/h)	1114 (para H=1)		A optimizar
Cd	0,8	Pec (kW)	396,469539	twait (min)	0	Xij-WL-H	1351,02095		SFC
ρ_{air} (kg/m ³)	1,29	Potencias entregadas por el camión		td,cycle (min)	12,4883333	Xij-WL	1351,02095		Nuevos valores
AF (m ²)	15,408	a1	-7,293	Consumos de combustible		Tiempo de espera y nuevos valores			
a (kg/m)	7,950528	a2	178,8	mf,ij (kg/h)	22,0793629	twait (min)	1,51166667		
g (m/s ²)	9,81	a3	-492,7	mf,ji (kg/h)	81,7936607	td,cycle (min)	14		
θ (rad)	0,00121847	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,idle (kg/h)	4,67	Mf,ce (kg)	6,77306926		
f	0,035	Pav,ec (kW)	500,097866	Mf,ce (kg)	6,6554112	Fuel cons. (kg/h)	29,0274397		
Crr	0,006	Consumo específico al freno		Fuel cons. (kg/h)	31,9758179	xce (1/h)	4,28571429		
b (m/s ²)	0,414162886	b1	1,41	Número de viajes por hora		Xij (1/h)	17,1428571		
c (m/s ²)	0,390256517	b2	-28,95	xce (1/h)	4,80448419	qd (t/h)	301,285714		
Velocidad relativa respecto al viento		b3	350,5	nd	4	Xij-WL-H	1205,14286		
U (m/s)	0	Bf,ce (g/kWh)	237,579063	Xij (1/h)	19,2179367	Xij-WL	1205,14286		
β (rad)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	Demanda de material		SFC global			
Vce (m/s)	5,235638234			qd (t/h)	337,755238	SFCg (g/t)	96,3452242		
Vec (m/s)	8,498488351								
Vr,ce (m/s)	5,235638234								
Vr,ec (m/s)	8,498488351								
Datos de las instalaciones									
Qc (t/h)	1300								
Qe (t/h)	1200								
H (h/año)	4000								
i (molinos)	2								
j (excavadoras)	3								
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)							

Figura 20: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C2-E1 (Fuente propia)

Al igual que en el trayecto C₁-E₃, se obtienen 1205 t/h de producción, que se dan por válidas. La tabla con los resultados destacables se muestra a continuación:

Tabla 16: Resultados del cálculo del nº de camiones para la ruta C2-E1 (Fuente propia)

SFC	96,3 g/t
Nº camiones	4
Producción	1205 t/h
Consumo de combustible	29,03 kg/h



4.5.5. Ruta C₂-E₂

Optimizando los camiones para esta ruta, se llega a un valor de 3,94 camiones, que hace prácticamente inmediata la decisión de utilizar 4 camiones.

Por tanto, para 4 camiones los valores hallados son los siguientes:

Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC			
WE (t)	41,5	L (km)	1,7	tce (s)	324,697759	SFC (g/t)	106,227995		Datos
WL (t)	60,8	Potencias solicitadas por el camión		tec (s)	200,035575				Variables
WG (t)	102,3	Pce (kW)	92,8817167	tload (min)	3,5	Restricciones			Restricciones
Constantes a, b y c		Pec (kW)	362,635299	tUL (min)	0,5	Di (t/h)	1114 (para H=1)		A optimizar
Cd	0,8	Potencias entregadas por el camión		twait (min)	0	Xij-WL-H	1144,86967		SFC
ρ _{air} (kg/m ³)	1,29	a1	-7,293	td,cycle (min)	12,7455556	Xij-WL	1144,86967		Nuevos valores
AF (m ²)	15,408	a2	178,8	Consumos de combustible		Tiempo de espera y nuevos valores			
a (kg/m)	7,950528	a3	-492,7	mf,ij (kg/h)	22,0667512	twait (min)	1,25444445		
g (m/s ²)	9,81	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,ji (kg/h)	74,8134866	td,cycle (min)	14		
θ (rad)	0,00121847	Pav,ec (kW)	500,097866	mf,idle (kg/h)	4,67	Mf,ce (kg)	6,55629966		
f	0,035	Consumo específico al freno		Mf,ce (kg)	6,45866207	Fuel cons. (kg/h)	28,0984271		
Crr	0,006	b1	1,41	Fuel cons. (kg/h)	30,4043023	xce (1/h)	4,28571429		
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95	Número de viajes por hora		Xij (1/h)	17,1428571		
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	xce (1/h)	4,70752332	qd (t/h)	260,571429		
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	nd	4	Xij-WL-H	1042,28571		
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	Xij (1/h)	18,8300933	Xij-WL	1042,28571		
β (rad)	0	Demanda de material		SFC global					
Vce (m/s)	5,235638234			qd (t/h)	286,217418	SFCg (g/t)	107,833876		
Vec (m/s)	8,498488351								
Vr,ce (m/s)	5,235638234								
Vr,ec (m/s)	8,498488351								
Datos de las instalaciones									
Qc (t/h)	1300								
Qe (t/h)	1200								
H (h/año)	4000								
i (molinos)	2								
j (excavadoras)	3								
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)							

Figura 21: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del n° de camiones en la ruta C₂-E₂ (Fuente propia)

Se obtienen, como en la ruta C₁-E₁, 1042 t/h de producción, que, aun siendo un valor bajo, se aproxima lo suficiente a la demanda real como para ser tomado como válido. Así pues, los resultados obtenidos fueron:

Tabla 17: Resultados del cálculo del n° de camiones en la ruta C₂-E₂ (Fuente propia)

SFC	107,8 g/t
Nº camiones	4
Producción	1042 t/h
Consumo de combustible	28,10 kg/h



4.5.6. Ruta C₂-E₃

El número de camiones ideal en esta ruta es 4,33. Si se toman 4 camiones, la producción es de 1100 t/h, que es un valor muy próximo a las 1114 t/h. Por ello, se asume que es un valor válido. Esto significa que no hay tiempo de espera (no hay recálculo).

Sabido esto, los resultados para 4 camiones son los que figuran a continuación:

Masas del camión		Distancia entre molino y excavadora		Tiempos en el ciclo		SFC		
WE (t)	41,5	L (km)	1,8	tce (s)	343,797627	SFC (g/t)	111,934345	Datos
WL (t)	60,8			tec (s)	211,802373			Variables
WG (t)	102,3	Potencias solicitadas por el camión		tload (min)	3,5	Restricciones		Restricciones
		Pce (kW)	92,7843959	tUL (min)	0,5	Di (t/h)	1114 (para H=1)	A optimizar
Constantes a, b y c		Pec (kW)	361,609294	twait (min)	0	Xij-WL-H	1100,45249	SFC
Cd	0,8	Potencias entregadas por el camión		td,cycle (min)	13,26	Xij-WL	1100,45249	
ρ _{air} (kg/m ³)	1,29	a1	-7,293	Consumos de combustible		SFC global		
AF (m ²)	15,408	a2	178,8	mf,ij (kg/h)	22,0436298	SFCg (g/t)	111,934345	
a (kg/m)	7,950528	a3	-492,7	mf,ji (kg/h)	74,6018167			
g (m/s ²)	9,81	Pav,ce (kW)	243,517073	mf,idle (kg/h)	4,67			
θ (rad)	0,00121847	Pav,ec (kW)	500,097866	Mf,ce (kg)	6,80560818			
f	0,035	Consumo específico al freno		Fuel cons. (kg/h)	30,7946071			
Crr	0,006	b1	1,41	Número de viajes por hora				
b (m/s ²)	0,414162886	b2	-28,95	xce (1/h)	4,52488688			
c (m/s ²)	0,390256517	b3	350,5	nd	4			
Velocidad relativa respecto al viento		Bf,ce (g/kWh)	237,579063	Xij (1/h)	18,0995475			
U (m/s)	0	Bf,ec (g/kWh)	206,305031	Demanda de material				
β (rad)	0			qd (t/h)	275,113122			
Vce (m/s)	5,235638234							
Vec (m/s)	8,498488351							
Vr,ce (m/s)	5,235638234							
Vr,ec (m/s)	8,498488351							
Datos de las instalaciones								
Qc (t/h)	1300							
Qe (t/h)	1200							
H (h/año)	4000							
i (molinos)	2							
j (excavadoras)	3							
n (camiones)	10	(5 camiones de cada tipo)						

Figura 22: Hoja de cálculo con los resultados del cálculo del nº de camiones en la ruta C₂-E₃ (Fuente propia)

El resumen de los cálculos se refleja en la siguiente tabla:

Tabla 18: Resultados del nº de camiones en la ruta C₂-E₃ (Fuente propia)

SFC	111,9 g/t
Nº camiones	4
Producción	1110 t/h
Consumo de combustible	30,79 kg/h



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras hallar las velocidades óptimas y realizar todos los cálculos, los resultados se pueden resumir en las siguientes tablas:

- Velocidades óptimas

Tabla 19: Velocidades óptimas del camión, calculadas en base al trayecto C1-E2 (Fuente propia)

V _{ce} óptima	18,85 km/h (= 5,24 m/s)
V _{ec} óptima	30,6 km/h (= 8,5 m/s)

- Valores para un solo camión

Tabla 20: Resumen de cálculos del SFC para un camión (Fuente propia)

Ruta (C-E)	Longitud (km)	Carga del camión (t)	Producción (t/h)	SFC (g/t)
1-1	1,45	60,8	318,3	91,96
1-2	1,5	70,3	360	86,8
1-3	1,6	70,3	344,9	92,1
2-1	1,65	70,3	337,8	94,7
2-2	1,7	60,8	286,2	106,2
2-3	1,8	60,8	275,1	111,9

- Valores para varios camiones por trayecto

Tabla 21: Resumen de cálculos del nº de camiones en cada ruta (Fuente propia)

Ruta (C-E)	Longitud (km)	Carga del camión (t)	Nº de camiones	Producción (t/h)	SFC (g/t)
1-1	1,45	60,8	4	1042	95,2
1-2	1,5	70,3	3	1080	86,8
1-3	1,6	70,3	4	1205	94
2-1	1,65	70,3	4	1205	96,3
2-2	1,7	60,8	4	1042	107,8
2-3	1,8	60,8	4	1110	111,9



El análisis de los resultados se estructura en 3 apartados:

- Un primer apartado en el que se comparan los SFC hallados para cada ruta con los SFC de operación real, calculando el ahorro de combustible.
- Un segundo apartado en el que se analiza la variación del SFC en una ruta concreta, tanto con varios camiones como con uno solo, si se modifican determinadas variables.
- Un tercer y último apartado en el que se compara el consumo global de la red de transporte actualmente instalada, utilizando los consumos reales y comparándolo con los consumos calculados.

5.1. Comparativa de SFC real con SFC del modelo

De los datos de campo se obtienen los SFC reales de cada ruta. Como se indicaba en la tabla 5, en la operación real trabajan 10 camiones, repartidos entre las 6 rutas.

Comparando estos datos reales con los SFC calculados mediante el modelo, es posible hacerse una idea del impacto que tiene una variación de la velocidad en el consumo, así como un cambio en el tipo de camión utilizado.

La siguiente tabla contiene las características de cada ruta, el SFC real y el SFC del modelo:

Tabla 22: Comparación de SFC real y SFC calculado para cada ruta (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)

Ruta (C-E)	Longitud (km)	Carga real del camión (t)	SFC real (g/t)	Carga de camión para el cálculo (t)	SFC del modelo (g/t)
1-1	1,45	52	126	60,8	91,96
1-2	1,5	65	91	70,3	86,8
1-3	1,6	65	93	70,3	92,1
1-3	1,6	65	81	70,3	92,1
2-1	1,65	65	101	70,3	94,7
2-1	1,65	65	88	70,3	94,7
2-2	1,7	52	136	60,8	106,2
2-2	1,7	52	100	60,8	106,2
2-3	1,8	52	125	60,8	111,9
2-3	1,8	52	111	60,8	111,9



A partir de estos datos se puede calcular el ahorro de combustible para cada ruta, comparando ambos SFC's mediante la fórmula:

$$\% \text{ ahorro} = \frac{\text{SFC}_{\text{real}} - \text{SFC}_{\text{modelo}}}{\text{SFC}_{\text{real}}} \cdot 100 \quad [30]$$

Tabla 23: Ahorro de combustible utilizando el modelo respecto a las condiciones de operación de la mina (Fuente propia)

Ruta (C-E)	SFC real (g/t)	SFC del modelo (g/t)	% ahorro
1-1	126	91,96	27,02
1-2	91	86,8	4,62
1-3	93	92,1	0,97
1-3	81	92,1	-13,70
2-1	101	94,7	6,24
2-1	88	94,7	-7,61
2-2	136	106,2	21,91
2-2	100	106,2	-6,20
2-3	125	111,9	10,48
2-3	111	111,9	-0,81

En la mayoría de los casos se observa un ahorro de combustible, superando en algunos casos el 20%. En otros casos se produce un aumento en el consumo, que se debe a que las velocidades de los camiones en ese trayecto son más adecuadas que las óptimas calculadas para la ruta C₁-E₂.

En cualquier caso, haciendo la media de todos los porcentajes de ahorro, se obtiene un **ahorro medio del 4,3%**, confirmando que simplemente con una mejora en la velocidad de los camiones, se consigue ahorro de combustible.



5.2. Variación del SFC global al modificar otros parámetros de cálculo. Análisis de sensibilidad.

Para simplificar el cálculo esta variación se aplica a una de las rutas. La ruta elegida, dado que se conocen más datos reales de ella (Banerjee, 2016), es la ruta C₁-E₂.

En primer lugar se comprueba, para el caso de varios camiones, cómo varía el SFC global, la velocidad óptima y el número de camiones necesarios, al modificar la producción de material, la carga máxima de los camiones y la distancia recorrida.

Sean los datos de la ruta C₁-E₂:

Tabla 24: Datos de cálculo de la ruta C1-E2 (Fuente propia)

Longitud (km)	Demanda de material (t/h)	Carga del camión (t)	V _{ce} óptima (km/h)	V _{ec} óptima (km/h)	Trayectos por hora (1/h)	Nº de camiones	SFC (g/t)
1,5	360	70,3	18,85	30,6	5,12	3	86,8

En rojo se remarcan las características que se van a modificar para comprobar la variación de los demás parámetros. En todos los casos la producción total es de 1114 t/h.

En primer lugar, fijando la carga del camión en 70,3 t y la demanda de material por camión en 360 t/h, se modifica la longitud del trayecto:

Tabla 25: Variación de velocidades óptimas, nº de camiones y SFC al modificar la longitud (Fuente propia)

Longitud (km)	V _{ce} óptima (km/h)	V _{ec} óptima (km/h)	Trayectos por hora (1/h)	Nº de camiones	SFC (g/t)
1	10,5	30,1	5,12	3	62,9
1,2	13,5	30,4	5,12	3	72,8
1,5	18,85	30,6	5,12	3	86,8
1,7	23,1	30,9	5,12	3	95,9
2	29,9	32,4	5,12	3	109,7



Se puede observar que las variaciones de longitud y las de SFC y velocidad son directas; es decir, **aumentos en la longitud de trayecto producen aumentos en las velocidades óptimas y en el SFC**. El resto de parámetros permanece constante.

Se repite el mismo proceso, ahora variando la demanda de material, con la longitud y la carga del camión fijos en 1,5 km y 70,3 t respectivamente:

Tabla 26: Variación de velocidades óptimas, nº de camiones y SFC con la demanda de material (Fuente propia)

Demanda de material (t/h)	V _{ce} óptima (km/h)	V _{ec} óptima (km/h)	Trayectos por hora (1/h)	Nº de camiones	SFC (g/t)
300	12,5	31,3	4,27	4	89,3
330	15,3	30,9	4,69	4	88,1
360	18,85	30,6	5,12	3	86,8
390	23,25	30,6	5,55	3	85,6
420	28,3	31,4	5,97	3	84,8
450	33,7	33,3	6,4	3	84,7
480	39,2	36,1	6,83	3	85,8
510	44,9	39,7	7,25	2	88,9

La **demanda de material y las velocidades óptimas** se constata que son **lineales**. En cambio, el SFC disminuye hasta una demanda de material, a partir de la cual vuelve a aumentar. Esto quiere decir que ha llegado a su punto óptimo. Es decir, **al aumentar la demanda disminuye el SFC** hasta que se alcanza la demanda del **punto óptimo, a partir de la cual el SFC vuelve a aumentar**.

Por último, se repite el cálculo, modificando la carga del camión. Los datos que se dejan fijos ahora son la longitud del trayecto (1,5 km) y la demanda de material (360 t/h). La siguiente tabla muestra los resultados:



Tabla 27: Variación de velocidades óptimas, nº de camiones y SFC con la carga del camión (Fuente propia)

Carga del camión (t)	V _{ce} óptima (km/h)	V _{ec} óptima (km/h)	Trayectos por hora (1/h)	Nº de camiones	SFC (g/t)
50	43,6	39,7	7,2	3	109,5
60,8	27,8	30,1	5,92	3	92,5
70,3	18,85	30,6	5,12	3	86,8
80	13,9	31,3	4,5	3	82,2

La carga del camión y las velocidades óptimas tienen una relación inversa, igual que en el caso del SFC. Es decir, **a medida que aumenta la carga del camión, las velocidades óptimas y el SFC disminuyen.**

Para cuantificar las variaciones del SFC, que es lo verdaderamente importante, se realiza un análisis de sensibilidad.

5.2.1. Análisis de sensibilidad

Una vez es sabido en qué sentido se modifica el SFC al variar otros datos del modelo, hay que medir cuánto se modifica para establecer qué variable tiene más incidencia sobre el SFC.

Para cuantificar esa variación se utiliza el denominado índice de sensibilidad, que viene dado por la fórmula:

$$\text{Índice de sensibilidad} = \frac{\frac{\text{SFC modificado} - \text{SFC base}}{\text{SFC base}}}{\frac{\text{Variable modificada} - \text{variable base}}{\text{Variable base}}} \cdot 100 \quad [31]$$

Se define como la tasa de variación del SFC en relación a la tasa de variación de otra variable (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014). Puede medirse tanto para aumentos como para disminuciones porcentuales

Si el índice de sensibilidad sale positivo, quiere decir que el SFC y la variable estudiada tienen una relación directa, y viceversa (Benchmarking energy consumption for



dump trucks in mines, 2014). Cuanto mayor sea el valor absoluto del índice, más importancia tendrá la variable en el cálculo del SFC.

Las variables que se van a analizar con este índice son las utilizadas en el apartado anterior (salvo la demanda, que tiene variación parabólica, con vértice en el punto óptimo, y no se estudia), las velocidades y la pendiente de la mina.

En la siguiente tabla se recogen todos los datos obtenidos del análisis de sensibilidad, para una tasa de variación del 10% en todos los casos:

Tabla 28: Resultado del análisis de sensibilidad (Fuente propia)

	Valor base	Tasa de variación	Valor incrementado	Valor reducido	SFC base (g/t)	SFC del valor incrementado (g/t)	SFC del valor reducido (g/t)	Índice de sensibilidad (incremento)	Índice de sensibilidad (reducción)
Longitud (km)	1,5	10%	1,65	1,35	86,82	94,67	78,96	0,9042	0,9053
Carga del camión (t)	70,3	10%	77,33	63,27	86,82	82,16	92,5	-0,5367	-0,6542
V _{ce} (m/s)	5,236	10%	5,7596	4,7124	86,82	86,24	87,47	-0,0668	-0,0749
V _{ec} (m/s)	8,5	10%	9,35	7,65	86,82	86,75	87,5	-0,0081	-0,0783
Pendiente (°)	0,0714	10%	0,0786	0,0643	86,82	86,72	86,9	-0,0115	-0,0092

De estos resultados se pueden deducir varias afirmaciones:

- La longitud y el SFC tienen una relación directa; cuando aumenta la longitud aumenta el SFC. Además, el índice de sensibilidad es casi de valor unidad y es el de mayor absoluto de los calculados, por lo que tiene una gran importancia sobre el SFC.
- El resto de variables tienen una relación inversa con el SFC: cuando aumentan aquellas, éste disminuye.
- La carga del camión tiene bastante importancia sobre el SFC: es el segundo valor más alto de los calculados.
- El efecto de la velocidad del camión cuando va vacío es relativamente bajo, aunque tiene cierto efecto sobre el SFC.



- El efecto de la velocidad cuando va cargado y la pendiente es muy bajo, apenas afecta al valor del SFC.

5.3. Comparación del consumo global real con el consumo global utilizando los datos del modelo

Se sabe que la mina tiene una distribución real de camiones como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 29: Distribución real de la mina (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)

Trayecto (C-E)	Longitud (km)	Nº actual de camiones
1-1	1,45	1
1-2	1,5	1
1-3	1,6	2
2-1	1,65	2
2-2	1,7	2
2-3	1,8	2

Utilizando los consumos reales para dicha distribución, se sabe que el SFC global es de 103 g/t (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014).

Aplicando los consumos y otros datos del modelo se puede calcular el SFC global a partir del modelo. La siguiente tabla contiene los datos necesarios para el cálculo:

Tabla 30: Datos del modelo para el cálculo del SFC global de la instalación (Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines, 2014)

Ruta (C-E)	Longitud (km)	Consumo de combustible, $M_{f,ij}$ (kg)	Tiempo de ciclo (min)	Viajes por hora, x_{ce} (1/h)	SFC (g/t)	Nº de camiones	Producción por camión (t/h)	Tiempo de espera (min)
1-1	1,45	5,59	11,46	5,24	91,96	1	318,3	1,77
1-2	1,5	6,10	11,72	5,12	86,8	1	360	
1-3	1,6	6,61	14	4,28	94	2	301,3	
2-1	1,65	6,66	12,49	4,80	94,7	2	337,8	
2-2	1,7	6,46	12,75	4,71	106,2	2	286,2	
2-3	1,8	6,81	13,26	4,52	111,9	2	275,1	



Los datos de la ruta C₁-E₃ están adecuados al cálculo hecho para varios camiones, ya que a la excavadora número 3, con este reparto, van 4 camiones. Sabido esto, se calcula el SFC global mediante la fórmula:

$$SFC = \frac{\sum_i \sum_j M_{f,ij} \cdot x_{ce} \cdot n_d}{\sum_i \sum_j Q_{d,ij} \cdot n_d} \quad [32]$$

De esta forma, se obtiene un **SFC global de 98,6 g/t**. Comparándolo con el consumo global real, que son 103 g/t, se puede calcular el ahorro, que supone. Este **ahorro es del 4,3%**.

Por lo tanto, tiene sentido la búsqueda de la velocidad óptima.



6. CONCLUSIONES

En minería, el 21% de los costes los constituye el consumo energético. Más del 32% de ese consumo (en minas a cielo abierto) se lo llevan los camiones, cuyo principal gasto es el combustible. Se sabe que solo con utilizar las mejores técnicas disponibles, se puede reducir ese consumo energético un 25%.

En base a unas operaciones basadas en teoría de dinámica de vehículos, balances de masas y características de equipamiento y motores, se construyó un modelo con el que calcular un índice de consumo de combustible de los camiones, el SFC (*specific fuel consumption*), en su trayecto entre las excavadoras y los molinos de la instalación.

Mediante la herramienta Solver de Excel, se calcularon las velocidades óptimas de dichos camiones, tanto cargados como sin carga.

Una vez calculadas esas velocidades, se calculó el SFC para todos los trayectos que describirían los camiones en el interior de la mina, así como para el caso de varios camiones cubriendo cada trayecto para satisfacer una demanda obtenida de la operación real.

Tras haber calculado todo, se llevó a cabo el benchmarking, comparando los datos calculados con los datos de campo y viendo las ventajas o desventajas de asumir la velocidad óptima antes calculada. Con el *benchmarking* se llegó a las siguientes conclusiones:

- Calculando la velocidad óptima para una ruta, con unos requisitos de producción obtenidos de datos de campo, y aplicándola al resto de rutas, se obtuvieron unos SFC en general inferiores a los reales, llegando el ahorro en ocasiones a más de un 20%, y siendo la media de los ahorros igual al 4,3%.
- Al calcular el número de camiones por ruta, quedó de manifiesto la importancia de optimizar la cantidad de camiones que operan en cada trayecto, ya que un



exceso de camiones provoca un tiempo de espera que aumenta el SFC global respecto al caso anterior de un solo camión por ruta.

- Analizando el efecto de la modificación de diversas variables sobre el SFC se vio que tanto la longitud, como la carga del camión, como la demanda de material por camión afectan al valor del SFC. La longitud afecta directamente al SFC; es decir, cuando aumenta la longitud aumenta el SFC. La carga del camión, en cambio, afecta al consumo inversamente. Por su parte, la demanda de material tiene un perfil distinto: al ir aumentando la demanda, disminuye el SFC, hasta que se llega al punto óptimo; a partir de ahí al ir aumentando la demanda, el SFC aumenta.
- Para cuantificar el efecto de estas variaciones, y el de otras variables como la velocidad y la pendiente, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad. Este análisis permitió saber que los elementos con más incidencia sobre el SFC es la longitud, seguido de la carga del camión. La demanda de material no fue evaluada debido a su peculiar evolución, mientras las velocidades y la pendiente tuvieron menor incidencia
- Por último, se comparó el SFC de la instalación basado en datos de consumo reales con el SFC de la instalación calculado con datos del modelo. Al igual que en la comparación ruta a ruta, quedó demostrado que el uso de una velocidad óptima de una ruta, fija para todos los trayectos del camión, ayuda al ahorro de combustible. En este caso, el ahorro también fue del 4%.



7. LÍNEAS FUTURAS

Como continuación a este Trabajo Fin de Máster, hay una serie de líneas que se podrían seguir para ampliar el campo de este tema:

- Conseguir más datos de la mina en cuestión, para poder calcular las velocidades óptimas en cada ruta y ver qué efectos sobre el consumo tendría.
- Diseñar, mediante la ampliación del modelo de cálculo aquí presentado, una disposición de la instalación, calculando el número de camiones que se necesitarían en cada ruta para minimizar aún más el consumo.
- Utilizar el presente modelo para otras minas en funcionamiento diferentes a la presente, permitiendo así validar el modelo de cálculo.
- Utilizar el presente modelo para hacer una estimación previa del consumo de combustible en una mina antes de su apertura, así como para minimizar el consumo de combustible.



8. REFERENCIAS

An energy benchmarking model for ventilation systems of air-conditioned offices in subtropical climates. **Mui, K. W., Wong, L. T. y Law, L. Y. 2007.** s.l. : Elsevier, 2007, Applied Energy, Vol. 84, págs. 89-98.

Banerjee, Rangan. 2016. [Comunicación personal]. 2016.

Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines. **Sahoo, Lalit Kumar, Bandyopadhyay, Santanu y Banerjee, Rangan. 2014.** s.l. : Elsevier, 2014, Applied Energy, Vol. 113, págs. 1382-1396.

Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings. **Chung, William, Hui, Y. V. y Lam, Y. Miu. 2006.** s.l. : Elsevier, 2006, Applied Energy, Vol. 83, págs. 1-14.

Camp, Robert C. 2004. Best Practice Benchmarking: the Path to Excellence. [Documento]. s.l. : Global Benchmarking Network, 2004.

Caterpillar. 2012. 773G. *Dúmpfer rígido 773G.* [Catálogo]. 2012.

—. **2012.** 775G. *775G Off-Highway Truck.* [Catálogo]. 2012.

—. **2016.** Performance data sheet. *C27 ACERT DITA.* [Hoja de datos]. 2016.

Cooper, William W., Seiford, Lawrence M. y Zhu, Joe. 2011. *Handbook on Data Envelopment Analysis.* s.l. : Springer, 2011. págs. 1-40.

Energy Performance of Dump Trucks in Opencast Mine. **Sahoo, Lalit Kumar, Bandyopadhyay, Santanu y Banerjee, Rangan. 2010.** 2010.

Energy use pattern and benchmarking of selected greenhouses in Iran using data envelopment analysis. **Omid, M., y otros. 2011.** s.l. : Elsevier, 2011, Energy Conversion and Management, Vol. 52, págs. 153-162.

Eurotire, Inc. 24.00R35 | Eurotire. [En línea] [Citado el: 15 de Junio de 2016.] <http://www.eurotire.net/es/tires/24-00r35-etrac-es/>.



International Energy Agency. 2015. *Key World Energy Statistics 2015*. París : s.n., 2015.

MacKay, David J. C. 2009. *Sustainable energy - without the hot air*. s.l. : UIT Cambridge, 2009.

Minimum hot/cold/electric utility cost for heat exchange networks. **Holiastos, Konstantinos y Manousiouthakis, Vasilios. 2002.** s.l. : Elsevier, 2002, Computers and Chemical Engineering, Vol. 26, págs. 3-16.

Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption. **Saboo, Y. y Farzaneh, H. 2009.** s.l. : Elsevier, 2009, Applied Energy, Vol. 86, págs. 1925-1932.

The evolution of the ENERGY STAR energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use. **Boyd, Gale, Dutrow, Elizabeth y Tunnessen, Walt. 2008.** s.l. : Elsevier, 2008, Journal of Cleaner production, Vol. 16, págs. 709-715.

US Department of Energy. 2007. *Mining Industry Energy Bandwidth Study*. 2007.

US Energy Information Administration. 2016. *International Energy Outlook 2016*. Washington : s.n., 2016.

Vehicle mass as a determinant of fuel consumption and secondary safety performance. **Tolouei, Reza y Titheridge, Helena. 2009.** s.l. : Elsevier, 2009, Transportation Research Part D, Vol. 14, págs. 385-399.

Vehicle Speed Profiles to Minimize Work and Fuel Consumption. **Chang, David J. y Morlok, Edward K. 2005.** s.l. : ASCE Library, 2005, Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, págs. 173-182.