



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



TECNOLÓGICO DE MONTERREY
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA
Y CAMBIO CLIMÁTICO

Análisis del consumo de combustible para una determinada flota de autobuses en Chile monitoreada a partir de datos de telemetría

POR

Franco Nicolás Quezada Bizama

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:

Ph.D. José Ignacio Huertas (Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México)
Ph.D. Felipe Vásquez Stuardo (Universidad de Concepción, Concepción, Chile)

Agosto 2023
Monterrey (México)

El presente informe se enmarca en un contrato de confidencialidad entre las partes, por lo tanto, no se autoriza su reproducción total ni parcial.

Agradecimientos

Se agradece a la Facultad de Ingeniería y al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción por el apoyo a esta memoria de título. A la empresa Inway por la colaboración. A la Red Latinoamericana de Investigadores en Energía y Vehículos (RELIEVE) y al Grupo de Investigación en Energía y Cambio Climático del Tec de Monterrey por el apoyo técnico.

Esta memoria está dedicada a mi familia por su incansable apoyo en cada paso. Y a todos los amigos que hice en el camino, quienes supieron ser familia en cada lugar que estuve.

Resumen

Estudios reportan diferencias en el rendimiento energético para vehículos de tecnología similar, sugiriendo que existen variables que afectan el consumo, como las condiciones de operación. Este trabajo busca determinar el consumo energético de una flota compuesta por 15 buses diésel y 9 eléctricos, bajo condiciones reales de operación en Chile. El monitoreo de esta flota se realizó utilizando un sistema de telemetría comercial por más de tres meses, con datos obtenidos a $> 0,2$ Hz sobre localización, velocidad, RPM del motor y consumo energético. Se ajustó un modelo energético basado en la dinámica longitudinal del vehículo para obtener la eficiencia energética global. Como resultados, se obtuvo un consumo medio de 43,02 L/100km para los autobuses diésel y de 130,32 kWh/100km (12,45 DEL/100km) para los autobuses eléctricos, con una eficiencia global del 31,37% y del 78,45%, para diésel y eléctricos, respectivamente. En este caso, la eficiencia energética no se vio afectada por las condiciones de funcionamiento, pero el ralenti y las variaciones de altitud fueron las variables que más afectaron al consumo de energía.

Palabras clave: Consumo de energía, Eficiencia, Autobuses, Condiciones reales de funcionamiento, Telemetría

Abstract

Studies report differences in performance for vehicles of similar technology, suggesting that there are variables that affect consumption, such as the operating conditions. This work seeks to determine the energy consumption of a fleet composed of 15 diesel and 9 electric buses, under real operating conditions in Chile. The monitoring of this fleet was carried out using a commercial telemetry system for more than three months with data obtained at > 0.2 Hz of location, speed, engine RPM and energy consumption. The energy model based on vehicle longitudinal dynamics was adjusted to obtain the global energy efficiency. As results, an average consumption of 43.02 L/100km was obtained for diesel buses and 130,32 kWh/100km (12,45 DEL/100km) for electric buses, with an overall efficiency of 31.37% and 78,45%, for diesel and electric, respectively. In this case, energy efficiency was not affected by the operating conditions but idling and variations in altitude were the variables that most affected energy consumption.

Keywords: Energy consumption, Efficiency, Buses, Real operating conditions, Telemetry

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	ii
Lista de Tablas	iv
Lista de Figuras	v
Glosario	vi
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Hipótesis.....	2
1.4 Metodología.....	3
CAPÍTULO 2: Modelo de consumo de combustible a partir de dinámica longitudinal.....	4
2.1 Modelo de consumo estimado	4
2.2 Consumo de combustible adimensional	7
2.3 Resumen	8
CAPÍTULO 3: Análisis de datos.....	9
3.1 Preprocesamiento.....	9
3.2 Origen de los datos	11
3.3 Consideraciones parámetros del vehículo	15
3.4 Señales de entrada	17
3.5 Validación de datos	17
3.6 Frecuencia de uso	19
3.7 Ajuste del modelo.....	20
3.8 Determinación de eficiencia global	21
3.9 Comparación de consumo entre buses diésel y eléctricos	21
3.10 Comparación de consumo con datos globales.....	21
3.11 Emisiones de gases de efecto invernadero	21
3.12 Resumen	22
CAPÍTULO 4: Resultados	23
4.1 Consumos energéticos	23
4.2 Coeficiente que ajusta el consumo	24
4.3 Factores que inciden en el consumo	24
4.4 Recomendaciones para disminuir consumo	26
4.5 Consumo comparado	26

4.6 Emisiones.....	27
4.7 Resumen	27
CAPÍTULO 5: Propuesta de servicios	28
5.1 Mercado actual	28
5.2 Servicios disponibles a partir de las habilidades desarrolladas en esta memoria.....	29
5.3 Servicios que requieren desarrollo.	29
5.4 Resumen	30
CAPÍTULO 6: Conclusiones	31
Referencias	32
Anexo A: Carta Gantt.....	35
Anexo B: Especificaciones técnicas de la flota.....	36
Anexo C: Parámetros característicos de la flota.....	38

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Resumen de cantidad de vehículos	15
Tabla 3.2: Campaña de monitoreo	17
Tabla 3.3: Cantidad de CO ₂ por tipo de vehículo	22

Lista de Figuras

Figura 2.1: Volumen de control	4
Figura 2.2:DCL vehículo.....	5
Figura 3.1: Metodología para el tratamiento de datos.....	9
Figura 3.2: Mapa general	12
Figura 3.3: Rutas buses Mercedes Benz.....	13
Figura 3.4: Rutas buses Scania.....	14
Figura 3.5: Rutas buses King Long.....	14
Figura 3.6: Coeficiente de resistencia a la rodadura	16
Figura 3.7: Coeficiente arrastre aerodinámico	16
Figura 3.8: Error en la señal de posición.....	18
Figura 3.9: Corrección en la señal de pendiente	18
Figura 3.10: Filtro a la señal de consumo utilizado	19
Figura 4.1: Consumo energético en DEL/100km.....	23
Figura 4.2:Eficiencia global	24
Figura 4.3: Frecuencia de uso	25
Figura 4.4: Distribución de consumo	25
Figura 4.5: Consumo comparado con datos recopilados.....	26
Figura 4.6:Emisiones de CO ₂ cada 100 km.....	27

Glosario

CPs	:	Parámetros Característicos
VSP	:	Potencia Específica Vehicular
GPS	:	Sistema de Posicionamiento Global
SAFD	:	Distribución de Frecuencia Velocidad-Aceleración
SFC	:	Consumo Específico de Combustible
SEC	:	Consumo Específico Energético
ECU	:	Unidad de Control del Motor
DEM	:	Digital Elevation Model
DEL	:	Litro Equivalente de Diésel
WtT	:	Well to Tank
TtW	:	Tank to Wheel
GVWR	:	Peso Bruto Vehicular
DCL	:	Diagrama de Cuerpo Libre
EPA	:	Agencia de Protección al Medio Ambiente
GEI	:	Gases de Efecto Invernadero

Nomenclatura

\dot{v}_f	:	Flujo volumétrico de combustible
f_r	:	Coefficiente de rodadura
m	:	Masa del vehículo
g	:	Aceleración de gravedad
θ	:	Pendiente del camino
C_D	:	Coefficiente de arrastre
ρ_a	:	Densidad del aire
A_f	:	Área frontal del vehículo
V	:	Velocidad instantánea
m_f	:	Factor de masa de elementos rotantes
a	:	Aceleración
η	:	Eficiencia global
LHV	:	Poder calorífico inferior
ρ_f	:	Densidad del combustible

CAPÍTULO 1: Introducción

El presente proyecto de investigación se desarrolla en el tema de consumo energético aplicado a una determinada flota de buses de Chile, debido a una búsqueda personal de generar una contribución a empresas del sector transporte. El capítulo introductorio sienta bases sobre el contexto que justifica la relevancia del tema, para luego establecer los objetivos en que se enmarca este trabajo.

1.1 Contexto

La importancia de analizar el consumo de combustible para el sector de transporte terrestre radica en dos grandes factores: costos y emisiones asociadas. Si se habla de la posibilidad de disminuir consumo, esto afecta directamente en los costos de operación de la flota, para lo cual se establecen métricas de comparación como lo es el rendimiento en cantidad de litros por cada 100 km recorridos. Sin embargo, la disminución de consumo también conlleva una disminución de contaminantes, debido a que el proceso al interior del motor consiste en quemar combustible para la generación de energía desechando gases de escape, que contienen contaminantes en forma de NO_x, material particulado, entre otros [1]. El impacto que tienen las variaciones de consumo de combustible en los costos y emisiones vuelve relevante la determinación del consumo actual de la flota, para influir en la toma de decisiones.

Existen diferentes estudios que se han realizado para determinar el rendimiento, llegando a concluir que la región y el modo de operar son factores que inciden en el consumo de combustible, de electricidad para el caso de vehículos eléctricos. En una investigación de buses de transporte público llevada a cabo en Medio Oriente, [2] se determinó que el rendimiento en litros por 100 km recorridos oscila entre 28,9 y 32,4. Otro estudio realizado para un bus con capacidad de 49 pasajeros en la Ciudad de México [3] reportó un valor de 41 litros por cada 100 km recorridos aproximadamente. Para buses de una misma tecnología los consumos de combustible son diferentes, lo que realza la necesidad de analizar el consumo energético según su modo de operación, considerando los factores propios de cada región.

La eficiencia energética de flotas vehiculares es un tema de especial interés dentro de la ciencia; particularmente, existe una red de investigadores latinoamericanos desarrollando estudios en los distintos países del continente. La Red Latinoamérica de Investigación en Energía y Vehículos (RELIEVE), está enfocada en responder distintas preguntas de esta índole. La posibilidad de comparar rendimientos obtenidos en distintos países facilita el análisis del comportamiento actual de la flota en estudio bajo distintos contextos. Además, brinda un primer acercamiento que permite comparar resultados obtenidos en distintos lugares, con el fin de encaminar a conclusiones sobre elementos que llevan al rendimiento de cada vehículo según región y contexto de operación.

La contaminación emitida en Chile tiene un aporte relevante por parte del sector transporte; en ruta terrestre representa el 33% del total de NO_x a nivel nacional y 61% del material particulado fino, esto considerando únicamente la región metropolitana [4]. La adopción de nuevas tecnologías es una alternativa para reducir la cantidad de CO₂ emitido al ambiente, aunque es pertinente considerar otros factores de interés como el consumo de combustible, puesto que hay estudios que señalan un aumento en alrededor del 147% [5]. De todas maneras, la posibilidad de implementar una renovación de flota

para la utilización de vehículos eléctricos es una alternativa real para disminuir CO₂, pero se necesita estudiar variables como el consumo energético para determinar la viabilidad de dicha propuesta.

La obtención del consumo promedio para la flota de estudio bajo condiciones reales de operación permite analizar diferentes áreas de oportunidad que permiten mejorar su rendimiento. Chile es un país con una extensión territorial que le brinda la particularidad de condiciones climáticas diferentes en el norte con respecto a la zona centro-sur, además de una topografía marcada por cadenas montañosas, lo que afectaría el consumo de combustible comparado con vehículos de la misma tecnología. Sin embargo, sería desacertado asegurar que el consumo esté relacionado con el de otra región simplemente por compartir características geográficas similares, ya que también influye el modo de operación. Por lo tanto, es necesario realizar un estudio para cada zona.

Para analizar el consumo de combustible se decide aplicar un modelo energético fundamentado en la dinámica. Dicho modelo sienta sus bases en la dinámica longitudinal, donde a partir de la sumatoria de fuerzas que intervienen en el movimiento, se determina la potencia requerida por el motor, con lo que se obtiene el flujo volumétrico requerido en cada instante de tiempo [6], [7]. El modelo asume consumo únicamente cuando el vehículo está en movimiento, lo que supone un problema puesto que en condiciones reales de operación existen momentos de ralentí, donde esté con el motor encendido y sin velocidad instantánea. Esta consideración y la de consumo de los accesorios del vehículo debe ser incluida para mejorar la predicción del consumo energético total.

Cada fuerza que interviene en la dinámica longitudinal tiene un efecto distinto en el consumo energético. Para analizar cada efecto de cada uno se plantea el modelo normalizado, que posibilita la atribución de importancia relativa a las variables involucradas. Lo anterior tiene como último fin servir de base para la toma de decisiones en los distintos niveles, ya sea para el administrador de la flota como para las empresas de telemetría.

1.2 Objetivos

A partir de datos de telemetría, analizar el consumo de combustible de una flota de buses bajo condiciones reales de operación a lo largo de Chile y proponer una alternativa para disminuirlo.

1.1.1 Objetivos específicos

1. Determinar los coeficientes que ajustan el modelo de consumo teórico con el consumo real de una flota vehicular de Chile.
2. Agregar consumos en ralentí y de accesorios al modelo de consumo de combustible.
3. Determinar los factores más importantes en el consumo de combustible a partir del modelo para la flota en estudio.
4. Comparar el consumo energético para vehículos similares.
5. Identificar estrategias que busquen disminuir el consumo de combustible para la flota en estudio.
6. Identificar nuevos servicios que la empresa de telemetría puede ofrecer a sus clientes.

1.3 Hipótesis.

El modo de conducir y las condiciones de operación afectan el consumo de combustible. Las variables físicas inciden en distinta proporción en el consumo energético.

1.4 Metodología.

El trabajo tiene como objetivo determinar la eficiencia energética analizando el origen del consumo energético para una flota en estudio, con esto dar luces y reportar los primeros resultados sobre variaciones en rendimiento bajo el contexto real de operación en distintas situaciones.

Para el análisis del consumo energético es necesario tener un modelo que permita capturar todas las variables físicas que afecten la operación de la flota. Sin embargo, a este modelo es necesario entregarle parámetros propios del vehículo que permiten ajustar el consumo de combustible teórico con el reportado. Entonces, el primer paso consiste en determinar los distintos coeficientes necesarios, agregando las variables de entradas, las que son medidas mediante el monitoreo a cargo de la empresa Inway. Es necesario realizar un preprocesamiento antes de implementar el modelo en cuestión.

La segunda etapa consiste en ajustar el modelo mencionado, esto debido a que no se está considerando el consumo de combustible a raíz del estado de ralentí (vehículo detenido pero encendido), esto es indispensable si se quiere capturar el comportamiento real.

El beneficio de la utilización de este método es que hace posible identificar los aspectos que más peso tienen en el consumo de combustible para contar con un mejor contexto respecto de la operación del transporte en la toma de decisiones. La tercera etapa consiste en darle relevancia a cada elemento físico asociado a cada fuerza que compone la fuerza de tracción, esto a partir de un método que deriva del modelo.

La cuarta etapa consiste en comparar el rendimiento resultante del procesamiento con lo reportado por otros estudios en distintos vehículos, buscando tener un contexto general.

La quinta etapa busca que determinar las posibles estrategias para disminuir consumo de combustible. Esto se realiza a partir del análisis del consumo de combustible y del método desarrollado en el presente trabajo.

Finalmente, la última etapa se centra en proponer distintas estrategias que busquen disminuir el consumo de combustible. Para esto, primero se realiza un análisis del mercado para identificar posibles servicios de los cual basarse. Sin embargo, los servicios propuestos serán principalmente a raíz de lo desarrollado en la presente memoria.

CAPÍTULO 2: Modelo de consumo de combustible a partir de dinámica longitudinal.

En el presente capítulo se desglosa el origen y las condiciones del modelo utilizado para analizar el consumo energético.

Se busca generar un modelo que prediga el consumo basado en sensores disponibles en el bus basado en la dinámica longitudinal. En primera instancia, se presenta el modelo y se desarrolla el origen. Luego, se muestra una metodología que permite evaluar en qué medida aporta cada elemento en el consumo de combustible reportado.

2.1 Modelo de consumo estimado

La cinemática se refiere al movimiento de sólidos. El modelo energético basado en la cinemática vehicular busca, a partir de las fuerzas que intervienen en el movimiento, estimar el consumo energético de acuerdo con la potencia requerida. Este modelo considera el modo de conducir mediante la velocidad y aceleraciones, así como factores externos como la diferencia de alturas entre puntos consecutivos del camino recorrido.

En la Figura 2.1 se señala el volumen de control. Se realiza un balance energético considerando que la energía suministrada por el motor debe ser absorbida por la rueda, pasando por los diferentes elementos mecánicos de transmisión.

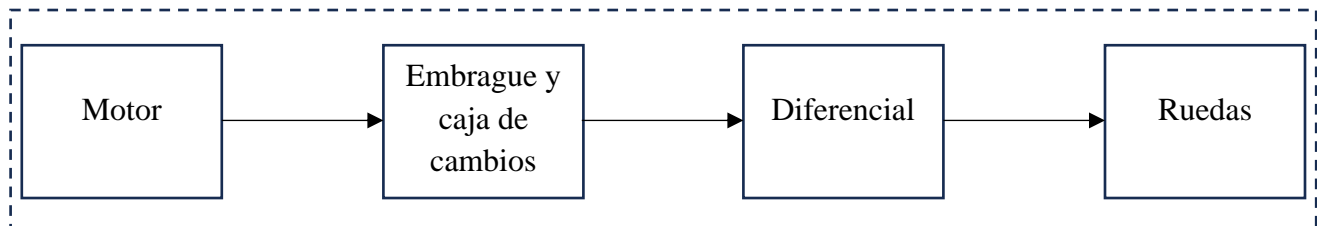


Figura 2.1: Volumen de control

Luego de realizar el balance de energías del sistema, donde se considera que lo suministrado por el motor (E) debe llegar a la rueda para realizar el movimiento, como se ve en la Ecuación (1).

$$E_{motor} = E_{rueda} \quad (1)$$

2.1.1 En movimiento (partir de fuerza de tracción)

Es necesario establecer el origen de la ecuación utilizada para determinar el consumo estimado. La Figura 2.2 muestra el Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) para un vehículo, donde se señalan las fuerzas que intervienen el movimiento.

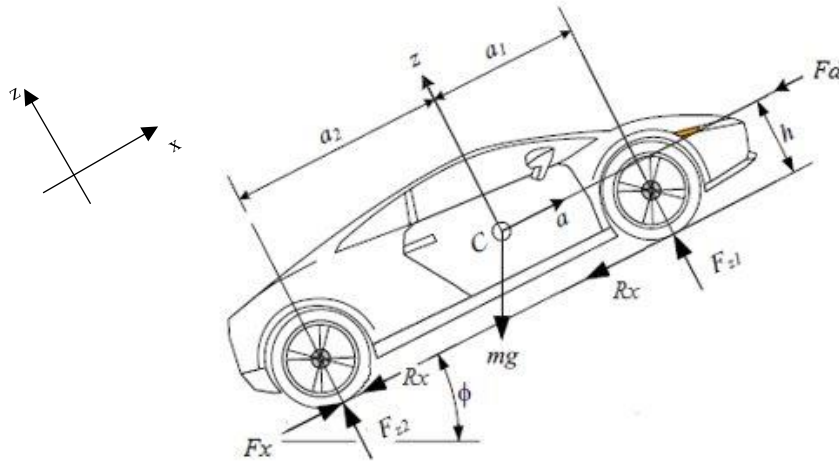


Figura 2.2:DCL vehículo

A partir del DCL del vehículo, se determina la fuerza en rueda (F_x), que es la sumatoria de las fuerzas que intervienen en el movimiento. Debido a que se estudia el avance del vehículo solo se considera el módulo del vector de la componente en el eje x , es decir, la componente paralela al camino.

$$F_x = F_d + F_r + F_g + m m_{fi} a \quad (2)$$

Un elemento necesario por considerar es la influencia de las masas inerciales a partir del factor de masa (m_{fi}), es decir, elementos rotacionales como la transmisión mecánica y el diferencial. En la Ecuación (3) se presenta una aproximación del factor de masa para vehículos pesados, que depende de la relación de transmisión (N_{td}) [8].

$$m_{fi} = 1 + 0.0011N_{td} + 0.0004N_{td}^2 \quad (3)$$

En la Ecuación (4) se muestra la fuerza de oposición generada por el viento, que depende del Coeficiente de arrastre (C_d), Densidad del aire (ρ_a), Área frontal (A_f) y Velocidad instantánea del vehículo.

$$F_d = \frac{1}{2} c_d \rho_a A_f V^2 \quad (4)$$

Por su parte, la Ecuación (5) representa la interacción rueda-piso, dependiendo del Coeficiente de fricción (f_r) de la interacción, Masa total del vehículo (m), aceleración de gravedad (g) y la diferencia de alturas (θ) entre puntos consecutivos del camino.

$$F_r = f_r m g \cos \theta \quad (5)$$

En la Ecuación (6) se muestra la fuerza gravitatoria (F_g), definida a partir de la masa total del vehículo (m), aceleración de gravedad (g) y la diferencia de alturas entre puntos consecutivos (θ).

$$F_g = m g \sin \theta \quad (6)$$

A partir de fuerza en rueda (F_x) y la velocidad instantánea (V) se determina la potencia requerida por el motor (P_e). Sin embargo, la presencia de elementos mecánicos como la transmisión mecánica y el diferencial generan un porcentaje mínimo de pérdidas de potencia, es por esta razón que se divide entre la eficiencia de dichos elementos, como se presenta en la Ecuación (7).

$$P_e = \frac{F_x \cdot V}{\eta_m} \quad (7)$$

Finalmente, el flujo volumétrico de combustible (\dot{v}_f) se determina a partir de la potencia demandada al motor (P_e), la eficiencia térmica del motor, y las características propias del combustible, que son densidad (ρ_f) y poder calorífico inferior (LHV), que para el caso de estudio se considera solamente diésel. Lo anterior representado en la Ecuación (8).

$$\dot{v}_f = \frac{P_e}{\rho_f \text{ LHV } \eta_{th}} \quad (8)$$

En la Ecuación (9) se muestra el cálculo para determinar el flujo volumétrico de combustible.

$$\dot{v}_f = \frac{[f_r m g \cos(\theta) + m g \sin(\theta) + \frac{1}{2} C_D \rho_a A_f V^2 + m m_f a] v}{\eta \text{ LHV } \rho_f} \text{ [L/s]} \quad (9)$$

Donde:

\dot{v}_f : Flujo volumétrico de combustible en L/s	A_f : Área frontal del vehículo en m ²
f_r : Coeficiente de rodadura	V : Velocidad instantánea en m/s
m : Masa del vehículo en kg	m_f : Factor de masa de elementos rotantes
g : Aceleración de gravedad en m/s ²	a : Aceleración en m/s ²
θ : Pendiente del camino en radianes	η : Eficiencia global
C_D : Coeficiente de arrastre	LHV : Poder calorífico inferior en kJ/kg
ρ_a : Densidad del aire en g/m ³	ρ_f : Densidad del combustible en g/m ³

Para obtener el Consumo Específico de Combustible (SFC por sus siglas en inglés) en unidades de consumo energético por cada 100km se determina a partir del Consumo Total de Combustible (v_f) sobre la Distancia Total recorrida (x).

$$SFC = \frac{v_f}{x} \cdot 100 \quad (10)$$

2.1.2 Consideraciones para vehículo eléctrico.

Lo descrito en la sección 2.1 corresponde a consumo de combustible. El caso de vehículos eléctricos elimina la intervención del combustible pasando únicamente a considerar la potencia en rueda dividida entre la eficiencia global de la tecnología.

$$E = \frac{[f_r m g \cos(\theta) + m g \sin(\theta) + \frac{1}{2} C_D \rho_a A_f V^2 + m m_f a] v}{\eta} [W] \quad (1)$$

2.2 Consumo de combustible adimensional

Para analizar el consumo de combustible, luego de haber definido todas las consideraciones impuestas en el modelo, se retoma el modelo inicial para explicar la forma en que se procedió a desglosar el consumo.

$$\dot{v}_f = \frac{[f_r m g \cos(\theta) + m g \sin(\theta) + \frac{1}{2} C_D \rho_a A_f V^2 + m m_f a] v}{\eta_{TD} \eta_{th} LHV \rho_f} [L/s] \quad (1)$$

Se descompone la ecuación para separar cada fuerza, lo que permite obtener el aporte porcentual de cada fracción en el consumo energético total.

$$1 = \frac{[f_r m g \cos(\theta)] v}{\eta_{TD} \eta_{th} LHV \rho_f \dot{V}_f} + \frac{\frac{1}{2} C_d \rho_a A v^3}{\eta_{TD} \eta_{th} LHV \rho_f \dot{V}_f} + \frac{m m_f a v}{\eta_{TD} \eta_{th} LHV \rho_f \dot{V}_f} + \frac{[m g \sin(\theta)] v}{\eta_{TD} \eta_{th} LHV \rho_f \dot{V}_f}$$

Cada componente está relacionada a una fuerza y, a su vez, a un factor físico. A continuación, se presenta la nomenclatura asignada.

$$\Pi_r = \frac{[f_r m g \cos(\theta)] v}{\eta LHV \rho_f \dot{V}_f} \quad (12)$$

$$\Pi_a = \frac{\frac{1}{2} C_d \rho_a A v^3}{\eta LHV \rho_f \dot{V}_f} \quad (13)$$

$$\Pi_i = \frac{m m_f a v}{\eta LHV \rho_f \dot{V}_f} \quad (14)$$

$$\Pi_g = \frac{[m g \sin(\theta)] v}{\eta LHV \rho_f \dot{V}_f} \quad (15)$$

El modelo se completa al agregar el flujo volumétrico base multiplicado por el diferencial de tiempo, esto debido a la condición de ralentí. La suma lleva al consumo total.

Este es un método que continúa en desarrollo por parte del Grupo de Investigación en Energía y Cambio Climático del Tec de Monterrey, México, en un estudio cuyo objetivo es asignar importancia a variables físicas relacionadas con el consumo.

2.3 Resumen

El modelo consiste en una ecuación que estima el consumo de combustible. Para esto, es necesario conocer los seis coeficientes (m , N_{td} , C_d , A , f_r y η) propios de cada vehículo y las cuatro variables (v , a , m_f y Θ) las que cambian en cada instante de tiempo y que son entregadas a partir del monitoreo de la flota. La combinación de los distintos coeficientes y variables permiten estimar el consumo de combustible (o eléctrico) estimado en cada instante de tiempo. Dado que hay parámetros que en la realidad se desconocen (m y η), estos se ajustan a partir de mediciones. En particular, se modifican estos parámetros de forma tal que la estimación de consumo minimice la diferencia con el consumo que se mide.

Luego, tras conocer realmente todos los parámetros del sistema, es posible conocer el aporte porcentual de cada fuerza al consumo de combustible.

CAPÍTULO 3: Análisis de datos

El presente capítulo muestra el modo de tratar la información entregada y las consideraciones utilizadas para la implementación del modelo mostrado en el capítulo anterior. En primera instancia se señalan las variables intermedias requeridas para implementar el modelo y se explica el origen de cada una. Luego, se especifica claramente la región de estudio junto con la descripción de la flota y las consideraciones que se tuvieron para definir los parámetros de los vehículos. A continuación, se presenta como se identifican y eliminan datos atípicos. Finalmente, teniendo todos los parámetros y variables se procede a realizar el análisis del consumo.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema de cómo se procedió a determinar los resultados finales con los datos de entrada.

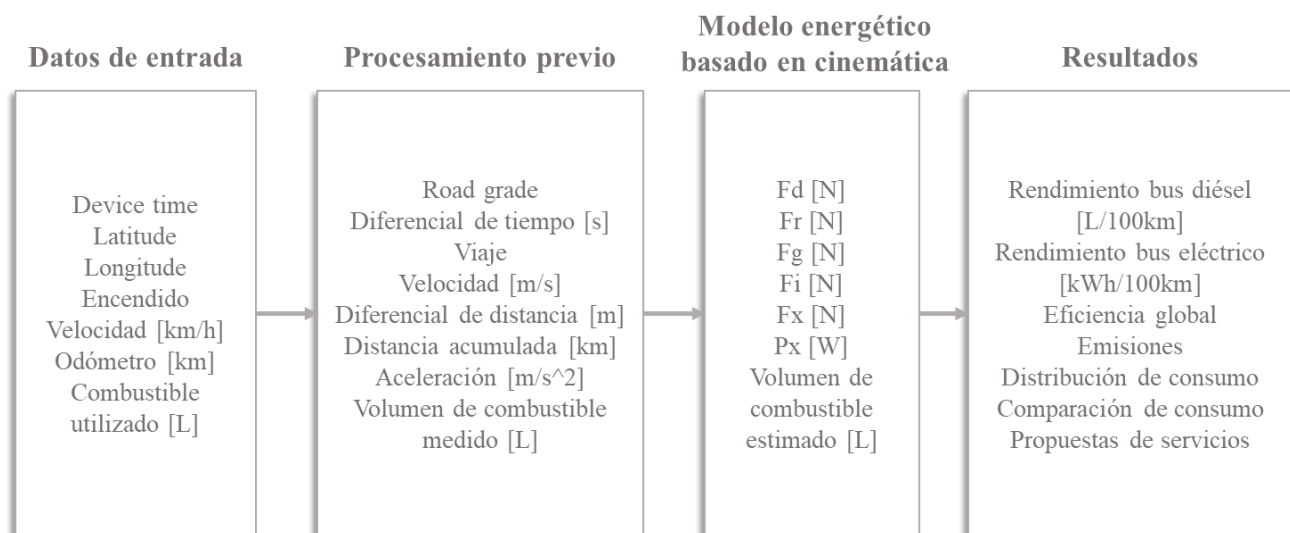


Figura 3.1: Metodología para el tratamiento de datos

El capítulo finaliza entregando las consideraciones y conversiones utilizadas para los resultados obtenidos.

3.1 Preprocesamiento

En esta sección se describe la obtención de aquellas variables intermedias necesarias para implementar el modelo visto en la sección 2.1. A continuación, se listan las variables por determinar:

- Diferencia de tiempo
- Número de viaje
- Velocidad en m/s
- Consumo de combustible
- Distancia recorrida
- Aceleración en m/s²
- Pendiente de la carretera
- Masas inerciales

3.1.1 Cálculo previo

Diferencia de tiempo

Considerando que cada dato está siendo reportado para un instante de tiempo, el transcurso entre dos datos consecutivos toma relevancia al momento de establecer una categorización para el número de viajes y para variables físicas como aceleración o el consumo estimado. Este último es determinado a partir del flujo volumétrico. Para su obtención, se resta el tiempo en segundo para dos instantes consecutivos.

Número de viajes

No se especifica previamente cuando un viaje está recién comenzando, condición necesaria para continuar con una correcta cronología. A modo de ejemplo, es posible que el dato reportado siguiente al actual sea el inicio de un nuevo recorrido y que éste comience en un lugar geográfico distinto. Este caso produce un error en variables como la diferencia de alturas o la aceleración. Es por esto es por lo que se decide subdividir el comportamiento de la flota en viajes bajo la condición de que, si la diferencia de tiempo entre dos datos consecutivos excede los 15 minutos, corresponde al inicio de un nuevo recorrido.

La decisión anterior comentada se basa en un estudio realizado en Santiago de Chile [9]. A pesar de que el caso de un vehículo en una zona de alto tráfico no signifique necesariamente que esté completamente detenido, el estudio señala que un recorrido de 30 minutos puede aumentar en total 12 minutos debido a congestión vehicular. Bajo dicha premisa es que se estableció que una diferencia de tiempo mayor a 15 minutos define el inicio de un nuevo viaje.

Velocidad

La señal entregada para el caso de velocidad está en unidades de km/h. Para la implementación del modelo se utilizó unidades según el Sistema Internacional, es decir, es necesario convertir a m/s como como se especifica a continuación:

$$1 \frac{km}{h} = 3,6 \frac{m}{s}$$

Consumo de combustible

Respecto a la señal de consumo energético, la señal entregada corresponde al histórico acumulado. Para identificar el consumo energético de cada bus según campaña de monitoreo se realiza la diferencia entre datos consecutivos. Lo anterior permite capturar de mejor manera la curva de consumo considerando distintos contextos.

Aceleración

La señal de aceleración es uno de los parámetros necesarios para describir el modo de conducción en la región de estudio. Además, es necesaria para calcular la fuerza de los elementos rotacionales. Esta señal se determina a partir de la diferencia de velocidades entre datos consecutivos sobre su diferencia de tiempo.

Diferencia de altura

La diferencia de alturas es un factor externo requerido para determinar la magnitud de la fuerza gravitatoria y la de resistencia a la rodadura. Para determinar la diferencia de alturas en cada tramo se ingresa la señal de posición a la base altimétrica de la plataforma *GPS Visualizer*, devolviendo la altura para cada par de coordenadas.

Masas inerciales

Masas inerciales es referido a aquellos elementos que rotan, es decir, la transmisión mecánica y el diferencial. A partir de la relación de transmisión se logra determinar el factor de masa. Para esto es necesario conocer las especificaciones técnicas sobre estos elementos de cada bus. La relación de transmisión depende de la marcha en la que se encuentre en un instante, para lo que se hace una estimación según la velocidad instantánea y el radio dinámico de la rueda.

Luego de haber determinado los rangos de velocidades con su respectiva masa efectiva, se compara la señal de velocidad para establecer cuál es el valor del factor de masa que le corresponde.

3.2 Origen de los datos

Los datos utilizados en este estudio son proporcionados por la empresa Inway, especializada en el monitoreo de flotas de vehículos para tres objetivos principales: seguimiento del estado de las baterías de vehículos eléctricos, evaluación y control de riesgo en conducción e integración de elementos periféricos en cabina [10].

3.2.1 Rutas

Chile es uno de los países que integra Sudamérica y que colinda con Argentina, Perú y Bolivia. Tal como la variedad de países del continente, comparte la característica de una topografía variable, destacando la presencia de la cordillera de la costa y la cordillera de los Andes. Su extensión territorial es cercana a 4.270 km solo considerando territorio continental. El ancho territorial máximo considerado de costa a cordillera de los Andes es cercano a 445 km. Dichas características llevan a que el país tenga una variedad de climas a medida que se transita de norte a sur. De modo general, el norte se caracteriza por tener un clima más cálido y poca presencia de lluvias, mientras que la zona centro-sur es completamente contrario al norte, resaltando que las lluvias y las temperaturas bajas incrementan a medida que se avanza hacia el sur. Finalmente, la zona central es una mixtura de las dos zonas mencionadas anteriormente, con un clima más templado[11].

En primer lugar, es necesario especificar claramente la región de estudio. Se consideran dos zonas de estudio, una ubicada en el norte del país y la otra en la zona centro-sur.

- Zona A: Ubicada en la zona centro-sur del país, específicamente en la región Metropolitana. Los buses que transitan en esta región son los 800 y BE.
- Zona B: Ubicada en la zona norte del país, específicamente en la región de Tarapacá. Los buses que transitan en esta zona son los 700.

La longitud total de la red vial chilena alcanza los 88.150 km, de los cuales solo un 24,49% está asfaltado, un 54,01% no se encuentra asfaltado y el porcentaje restante es una mezcla de soluciones básicas [12]. Si bien en el presente trabajo no se estudia el aporte específico de este elemento, es de interés para futuras investigaciones.

A continuación, en la Figura 3.2 se presenta un mapa mostrando las dos zonas.

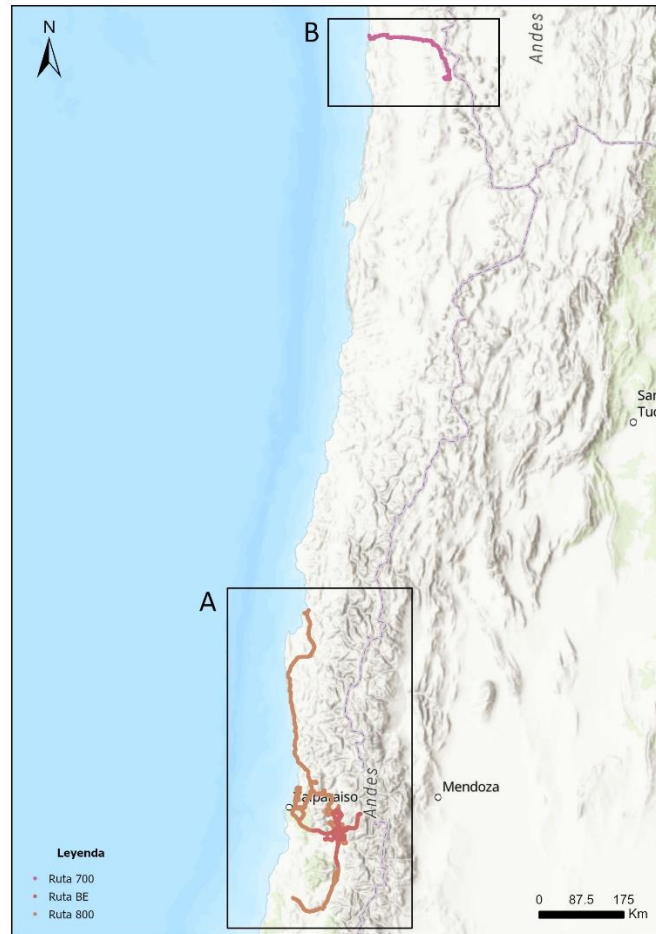


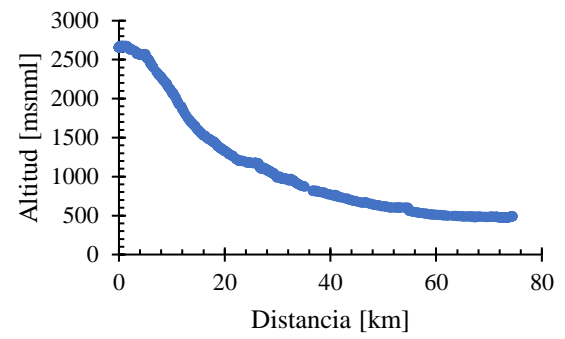
Figura 3.2: Mapa general

Se muestra las diferentes rutas recorridas por los distintos buses estudiados. En la Figura 3.3, Figura 3.4 y Figura 3.5 se resume la ruta con el perfil de alturas según trayecto. Se decide presentar el perfil de alturas únicamente de la zona donde transita con mayor frecuencia, resaltando que se pretende clarificar la diferencia de alturas de que cada bus debe recorrer.

Rutas buses Mercedes Benz



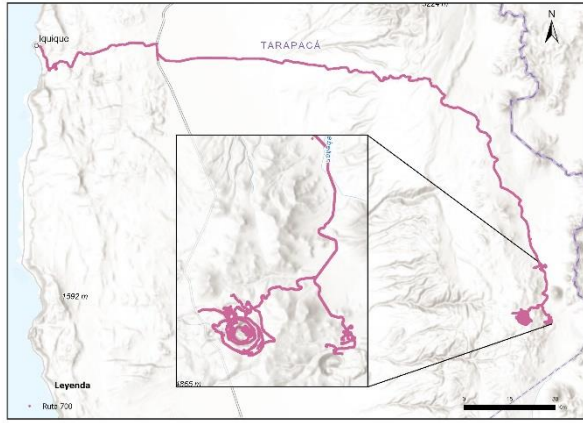
a) Ruta



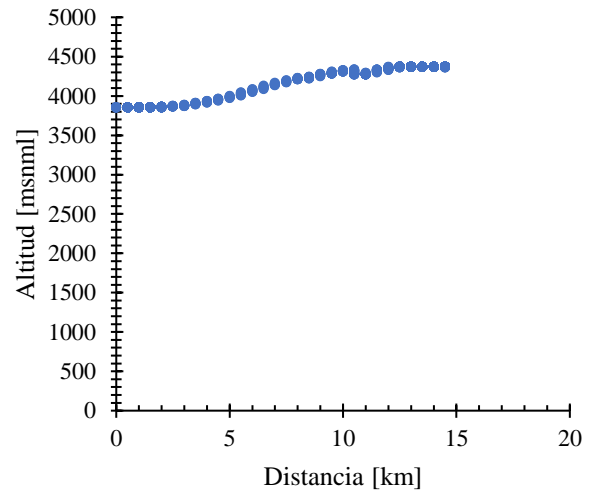
b) Perfil de altura

Figura 3.3: Rutas buses Mercedes Benz

Rutas buses Scania



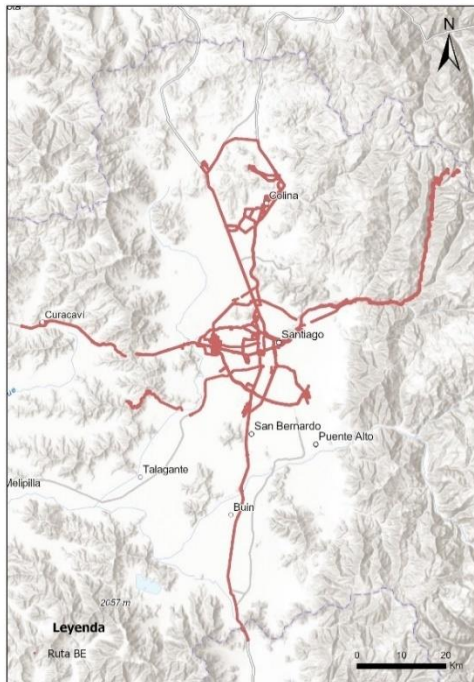
a) Ruta



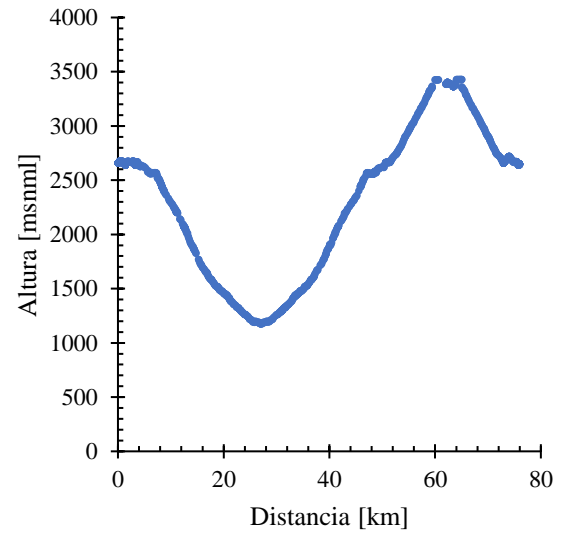
b) Perfil de altura

Figura 3.4: Rutas buses Scania

Rutas buses King Long



a) Ruta



b) Perfil de altura

Figura 3.5: Rutas buses King Long

3.2.2 Flota de buses

La flota estudiada está compuesta por 24 buses repartidos entre motor a diésel y otra cantidad con motores eléctricos. Los vehículos estudiados son:

- Mercedes Benz (diésel de 49 pasajeros)
- Scania (diésel de 49 pasajeros)
- King Long (eléctrico de 42 pasajeros)

Se detallada en la Tabla 3.1 la flota de buses estudiada. Además, se utilizó un código para identificar el tipo y modelo de bus.

Tabla 3.1: Resumen de cantidad de vehículos

Marca	Modelo	Año	Cantidad	Código de identificación
Mercedes Benz	0 500 RS 1936 4x2	2021	9	8xx
Scania	K 360 IB 4x2	2020	5	7xx
Scania	K 360 B 4x2	2019	1	7xx
King Long	XMQ 6130E	2020	9	BE-x

En el Anexo B se describen las características técnicas de cada vehículo.

Sobre la transmisión

Dada la escasez de información específica en las fichas técnicas de los vehículos eléctricos en estudio, fue necesario basarse en la información disponible sobre vehículos con características similares. En este sentido, se optó por utilizar los datos correspondientes a un bus de la marca BYD, que presentaba similitudes relevantes. Además, se tomó como referencia un estudio sobre transmisiones para vehículos eléctricos[13].

Tras considerar las diferentes opciones, se decidió utilizar la transmisión de la marca ZF, modelo AVE 130. Esta elección se basó en la información recopilada y en la adecuación de esta transmisión para el propósito y características de los vehículos eléctricos en estudio.

3.3 Consideraciones parámetros del vehículo

Para la masa que transporta la flota se considera que lleva un total de 30 pasajeros cada bus con un peso promedio por pasajero de 75 kg [14]. Al determinar los valores de los coeficientes físicos se estima la masa transportada mediante el método de gradiente reducido, dando un valor cercano al estimado, variando en promedio un 2%.

Se decide utilizar valores de literatura para el coeficiente de arrastre y rodadura. La manera de determinar ambos coeficientes es a partir de pruebas físicas, como Coast-Down. Sin embargo, aquello está fuera del alcance de la presente memoria.

Para el caso del coeficiente de resistencia a la rodadura, se decidió utilizar el valor de 0,01, considerando la literatura [6]. El valor del coeficiente no muestra variaciones para velocidades bajo los 100 km/h aproximadamente, tal como se muestra en la Figura 3.6.

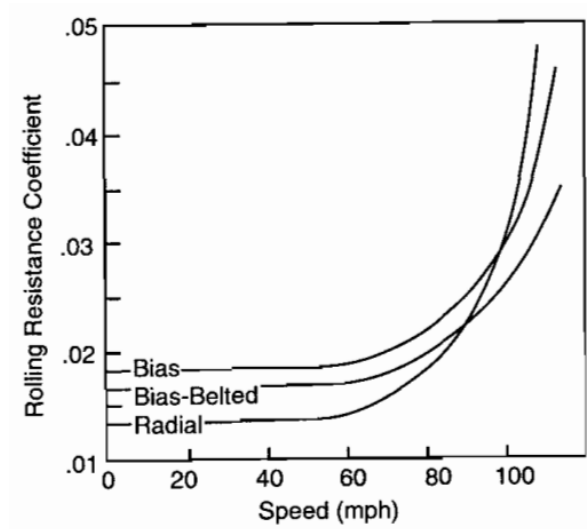


Figura 3.6: Coeficiente de resistencia a la rodadura

De manera similar, el valor para el coeficiente de arrastre se fija en 0,64 a partir de valores de referencia [3], [15].

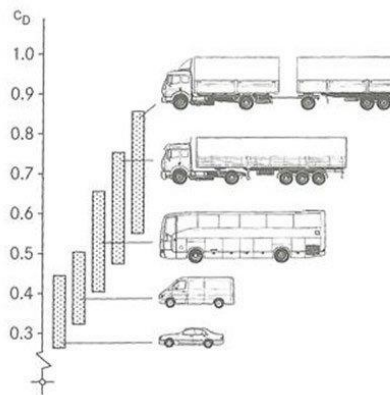


Figura 3.7: Coeficiente arrastre aerodinámico

Se define la eficiencia global como la combinación de las eficiencias de los elementos mecánicos de un vehículo y la eficiencia térmica del motor. Según la literatura, el valor para un motor diésel debe aproximarse a 40% [1] para condiciones ideales de operación. En relación con el caso de vehículos eléctricos, la información es más escasa, aunque se rescata que la Agencia de Protección al Medio Ambiente (EPA por sus siglas en inglés) estima que para vehículos livianos la eficiencia global es cercana al 65% [16].

3.4 Señales de entrada

Los buses tienen una serie de sensores instalados previamente por los fabricantes los que son utilizados para medir distintas variables, señales que llegan a la Unidad de Control del Motor (ECU en inglés). Para extraer la información se conecta a la ECU de los buses y se envía la información a la nube para ser leída de forma remota.

Las señales de entrada usadas para el presente trabajo son:

- Posición
- Altura
- Velocidad
- Combustible utilizado
- Odómetro

A pesar de que la señal de altura se despliega como información para usar, se detectaron tramos donde los datos no son consistentes con el lugar geográfico. Es por esta razón que se optó por usar la base de datos altimétricas Digital Elevation Model (DEM) de GPS Visualizer. El método fue validado en [17].

A continuación, se presenta la campaña de monitoreo y su frecuencia de muestreo categorizado por tipo de bus.

Tabla 3.2: Campaña de monitoreo

	7xx	8xx	BE-xx
Campaña de monitoreo (mes)	1	4	3
Frecuencia de muestreo (hz)	0,067	0,067	0,2
Dato por segundo (s)	15	15	5

3.5 Validación de datos

Una vez se tienen las señales es necesario hacer el proceso de validación de datos, esto para identificar posibles valores erróneos o atípicos, destacando que se concentran en las señales de consumo utilizado y posición.

3.5.1 Posición

La otra señal de entrada que se logró identificar con datos erróneos es la de posición. En la Figura 3.8 se observa un conjunto de puntos sobre el mapa, donde cada uno representa la posición en un determinado instante de tiempo.



Figura 3.8: Error en la señal de posición

Existe un rango de datos ubicados fuera del camino, lo que desencadena un error en la pendiente del camino para puntos consecutivos. Para identificar el rango aceptado se utilizó el software ArcGIS, donde se recrea el camino que debiese seguir el bus en caso de pasar por la zona que presenta errores de posición. Una vez se obtuvieron las coordenadas se ingresa a la base de datos altimétricas para obtener las alturas y a su vez determinar las pendientes entre puntos consecutivos.

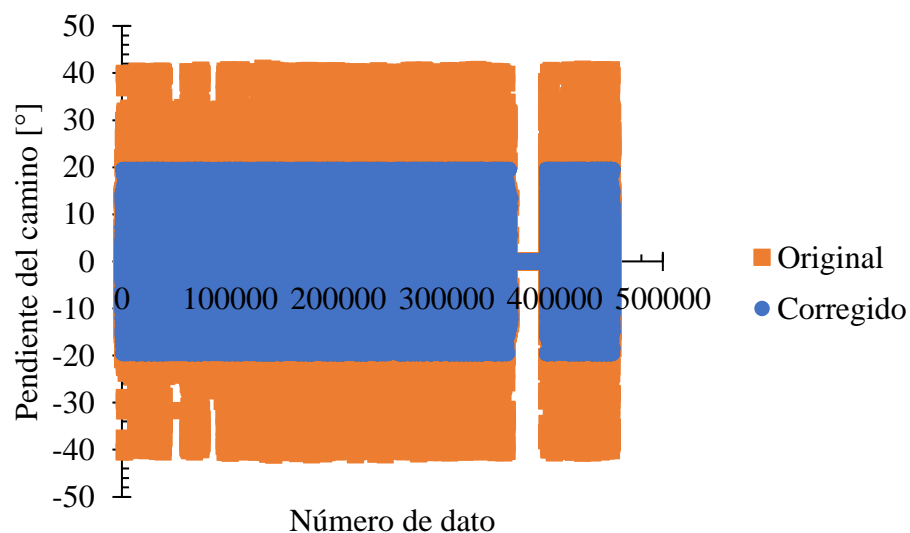


Figura 3.9: Corrección en la señal de pendiente

En la Figura 3.9 se compara lo obtenido con la señal de entrada y lo entregado por el camino trazado mediante ArcGIS, observando una diferencia significativa. Se continúa en el análisis eliminando los datos fuera del rango establecido por el camino trazado.

3.5.2 Consumo de combustible utilizado

Para el caso de la señal de entrada de consumo utilizado se observa un conjunto de datos que se distancia en orden de magnitud respecto de la media. Cabe mencionar que los datos de entrada tienen una precisión de centenas y los valores erróneos tienen un distanciamiento de dos órdenes de magnitud. En la Figura 3.10 a) es posible observar un ejemplo de los datos atípicos.

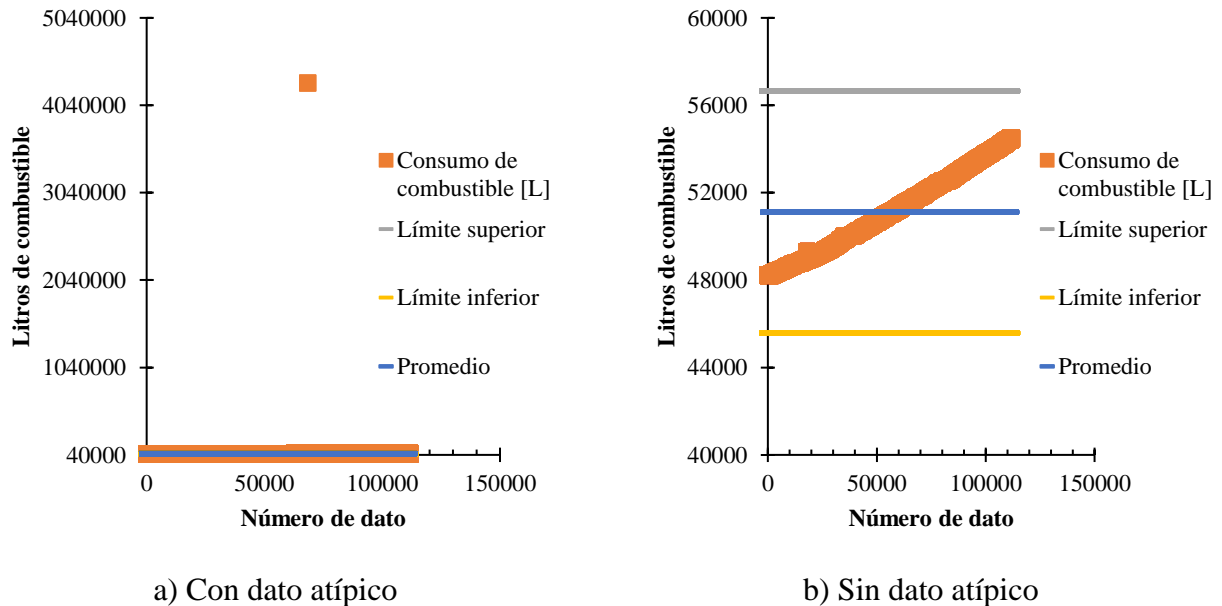


Figura 3.10: Filtro a la señal de consumo utilizado

Para corregir el error se estableció un rango dentro del que los datos fueron considerados válidos. Por el contrario, de estar fuera del mismo, se decidió eliminar el conjunto de señales correspondiente a ese instante de tiempo. Para fijar el rango aceptado se ha decidido utilizar el criterio de Chauvenet [18] como base para establecer los límites. Dicho criterio utiliza el promedio y desviación estándar para eliminar los datos que tienen una probabilidad baja de existencia. En la Figura 3.10 b) se observa el rango permitido, una vez eliminando los datos atípicos.

3.6 Frecuencia de uso

Un elemento clave en el análisis del consumo energético es el modo de operación de la flota. Establecer una frecuencia de tiempo en la que determinado bus está en cierto estado es un modo de asociar resultados con posibles causales. Bajo esta idea se definen cuatro posibles estados de operación:

- Ralentí
- Acelerando
- Desacelerando
- Velocidad crucero

Al obtener datos precisos sobre el tiempo de uso en cada uno de estos estados, se puede tener una visión completa del comportamiento del bus y realizar una evaluación más completa de las causales de su desempeño.

Ralentí

Se define el estado de ralentí cuando el vehículo está con el motor encendido y sin movimiento. Para determinar el porcentaje del tiempo en el que un vehículo se encuentra en ralentí se suma la totalidad de los intervalos con la condición previamente descrita y se divide entre el tiempo total de operación.

Acelerando

Toda diferencia positiva de velocidades es considerada como estado de aceleración. Para el cálculo del porcentaje del tiempo en este estado se suma el tiempo que cumpla con la condición para luego dividir sobre el tiempo total de operación.

Desacelerando

De manera contraria, un vehículo se encuentra desacelerando en los casos que la diferencia de velocidades entre instantes consecutivos sea negativa. Para determinar el porcentaje del tiempo que se encuentra en este estado se suma la totalidad del tiempo que cumple la condición y se divide entre el tiempo total de operación.

Velocidad crucero

Finalmente, el caso en que el vehículo tiene una velocidad distinta a cero y de manera constante entre instantes consecutivos se conoce como crucero. Para determinar el porcentaje del tiempo en que se encuentra en este estado se suma la totalidad del tiempo que cumple la condición y se divide entre el tiempo total de operación.

3.7 Ajuste del modelo

Debido a que el modelo planteado en la sección 2.1 se basa en la dinámica longitudinal vehicular, se asume la existencia de consumo energético únicamente cuando se encuentra en movimiento. En condiciones reales de operación el estado de ralentí tiene un consumo base debido a que el motor necesita un mínimo de velocidad de giro para mantenerse encendido.

Para obtener una idea aproximada del comportamiento completo se decidió realizar un estudio particular. Para esto, se promedia el consumo energético bajo la condición de estar encendido y detenido. Se agregó considerando el tramo de tiempo que permaneció en este estado.

A pesar de que un vehículo eléctrico no necesita una velocidad mínima de giro del motor para mantenerse encendido, no es válido asumir que al estar detenido no está generando consumo energético, esto es porque el uso de elementos como el aire acondicionado deben ser considerados en el análisis como uso de accesorios, los que pueden estar siendo utilizados sin movimiento. Entonces, para el procedimiento se ajusta de la misma manera que para el caso de un bus diésel.

3.8 Determinación de eficiencia global

El último elemento necesario para el modelo de estimación de consumo de combustible es determinar el valor de la eficiencia global. Al realizar una regresión lineal de los datos de consumo de combustible medido en comparación de lo estimado muestra una alta correlación, pero escalados, lo que evidencia la existencia de coeficientes mal ajustados. Se decide utilizar el método de gradiente reducido mostrado en la Ecuación 16 para determinar la eficiencia global de cada bus en estudio.

$$\text{Minimize} \left(\sum_{i=1}^n (V_{Medido} - V_{Estimado})^2 \right) \Bigg|_{\eta} \quad (16)$$

Donde n es la totalidad de datos para cada bus. El método de gradiente reducido consiste en determinar el valor que minimiza la diferencia entre dos variables. El presente caso es determinar el valor de la eficiencia global que consigue minimizar la diferencia entre el valor de consumo de combustible acumulado en comparación de lo entregado por el modelo que estima el consumo de combustible.

3.9 Comparación de consumo entre buses diésel y eléctricos

Dado que se está evaluando el rendimiento y analizando el consumo energético para buses diésel y eléctricos, es necesario tener un modo de comparación entre ambos. Para esto se establece la unidad de referencia denominada Litro Equivalente de Diésel (DEL por sus siglas en inglés).

Con esto, la equivalencia usada es de 1 DEL es a 10,47 kWh[19].

3.10 Comparación de consumo con datos globales

Buscando tener un contexto global sobre el rendimiento de la flota en estudio se compararon los resultados obtenidos con lo recopilado por estudios de la red RELIEVE. Debido a que se tienen vehículos de distintas categorías se consideró el rendimiento en DEL por cada 100km según su peso bruto vehicular (GVWR por sus siglas en inglés).

3.11 Emisiones de gases de efecto invernadero

El consumo de combustible tiene una cantidad de emisiones asociadas, cuya consideración se desglosa según dos procesos. El primero comprende desde la fuente hasta el almacenamiento (WtT por sus siglas en inglés), referido al estanque de combustible en el caso diésel y baterías en el caso eléctrico. El segundo, toma en cuenta las emisiones causadas por el funcionamiento vehicular (TtW por sus siglas en inglés), que para el caso eléctrico no hay.

Se desglosan las emisiones de cada fase en la Tabla 3.3. Para la primera (WtT), el caso diésel es referencial según lo reportado en Reino Unido[20] y para el caso eléctrico se considera el factor de emisión de la matriz energética[21]. Para la segunda, donde el vehículo está en funcionamiento, las emisiones son determinadas a partir de lo reportado en el “Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes”[22].

Tabla 3.3: Cantidad de CO₂ por tipo de vehículo

Fuente de energía	WtT	TtW			WtW
	kg CO _{2e} /DEL	CO ₂ kg/DEL	CH ₄ kg/DEL	N ₂ O kg/DEL	kg CO _{2e} /DEL
Diesel	0.64	2.68	0.0001	0.0001	3.36
Electric	2.01	0	0	0	2.01

Fuente: Para WtT en diésel [20], para eléctrico [21]. Para TtW [22]

Luego, se tienen factores de emisión para bus eléctrico y diésel con las que es posible determinar las emisiones asociadas a partir del rendimiento para la flota en estudio.

3.12 Resumen

El análisis de los datos se realiza de acuerdo con las variables requeridas por el modelo. Con el procesamiento descrito es posible pasar de los datos entregados por el monitoreo, a datos de entrada al modelo.

Para el caso del coeficiente aerodinámico y el de rodadura se toma un valor de referencia de literatura. Esto deja la tarea de determinar a partir de una prueba de Coast-Down el valor real para estos coeficientes. Por otro lado, el de eficiencia global se ajusta mediante el método de gradiente reducido, quedando claro la existencia de un grado de error considerado que los otros dos coeficientes no han sido determinados experimentalmente.

Finalmente, para las variables (o señales de entrada) se ha especificado el procedimiento utilizado para tratar los datos, buscando minimizar los errores producto de errores atípicos. Además, se agregan consideraciones sobre el consumo en ralentí, ya que este no está contemplado en el modelo descrito en el Capítulo 2. Finalmente, para comparar el rendimiento entre un vehículo diésel y uno eléctrico la equivalencia utilizada es de 1 DEL es a 10,47 kWh. Con esto ya se tiene todo lo necesario para obtener los resultados.

CAPÍTULO 4: Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la metodología y las consideraciones mostradas en los capítulos anteriores. En primer lugar, se presentan los resultados de consumo energético para toda la flota en estudio. A continuación, se presenta las eficiencias globales según las consideraciones especificadas anteriormente. Para realizar en análisis del consumo de combustible (o eléctrico) primero se determina el tiempo de uso según estado y luego, se determina el aporte porcentual de cada elemento en el consumo energético obtenido. Luego, a partir de estos resultados se generan recomendaciones para disminuir el consumo energético.

El capítulo finaliza con una comparación de los resultados obtenidos con la literatura para vehículos de tecnología similar y se estiman las emisiones de CO₂ a partir de los factores de emisión.

4.1 Consumos energéticos

El rendimiento de vehículos diésel se expresó en términos de cantidad de litros necesarios para recorrer 100 kilómetros, lo cual es la definición de Consumo Específico de Combustible (SFC por sus siglas en inglés). Para el caso de vehículos eléctricos, la unidad de medida es el Consumo Energético Específico (SEC por sus siglas en inglés), donde el consumo energético es medido en unidades de kWh.

Los resultados obtenidos a partir de la metodología descrita en la sección 3.9 permiten la comparación de consumo energético entre tecnología de buses diésel y eléctricos. A continuación, en la Figura 4.1 se resumen los resultados obtenidos respecto este tópico.

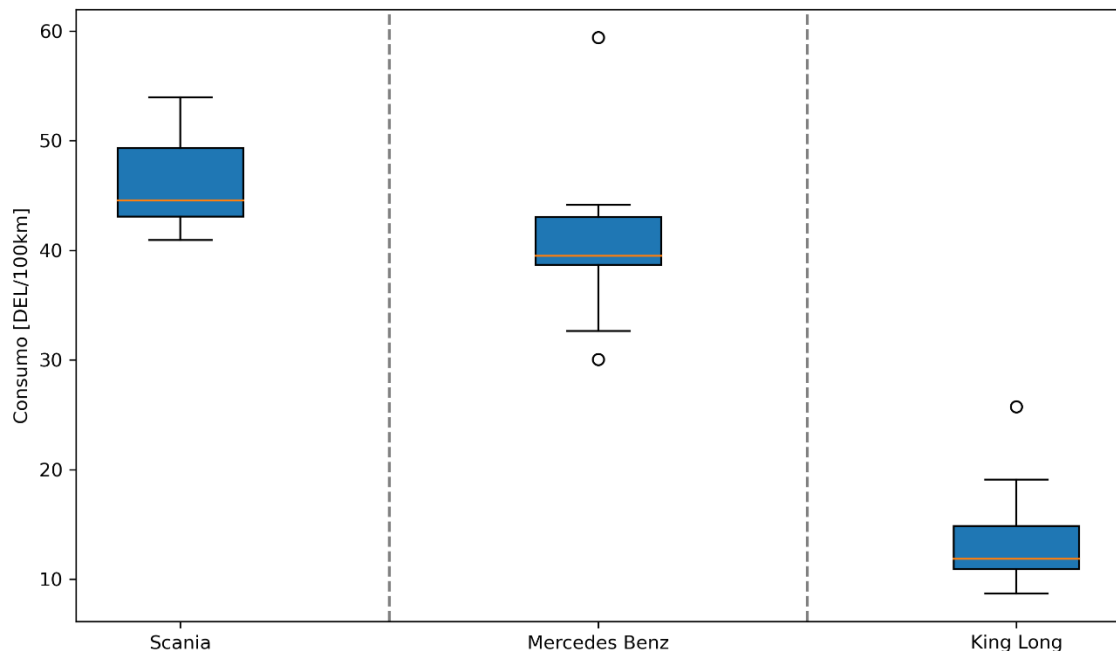


Figura 4.1: Consumo energético en DEL/100km

Como se observa en el gráfico, los autobuses Scania y Mercedes Benz tienen un rendimiento similar, con promedios en unidades de DEL/100 km de 46,24 y 39,71, respectivamente. Mientras tanto, King Long dista de los dos anteriores, con un consumo de 12,45 DEL/100 km.

4.2 Coeficiente que ajusta el consumo

La alta correlación ($R^2 \approx 0.99$) entre el consumo energético medido comparado con el estimado en combinación con una pendiente entre las curvas cercana a uno ($C_f \approx 1$) indica que el procedimiento captura casi en su totalidad los fenómenos involucrados. La relevancia de este resultado reside en la posibilidad de calificar según tecnología la flota de vehículos, y con esto agregar un nuevo elemento a la mejor toma de decisión.

A continuación, en la Figura 4.2 se resumen los resultados obtenidos respecto la eficiencia global.

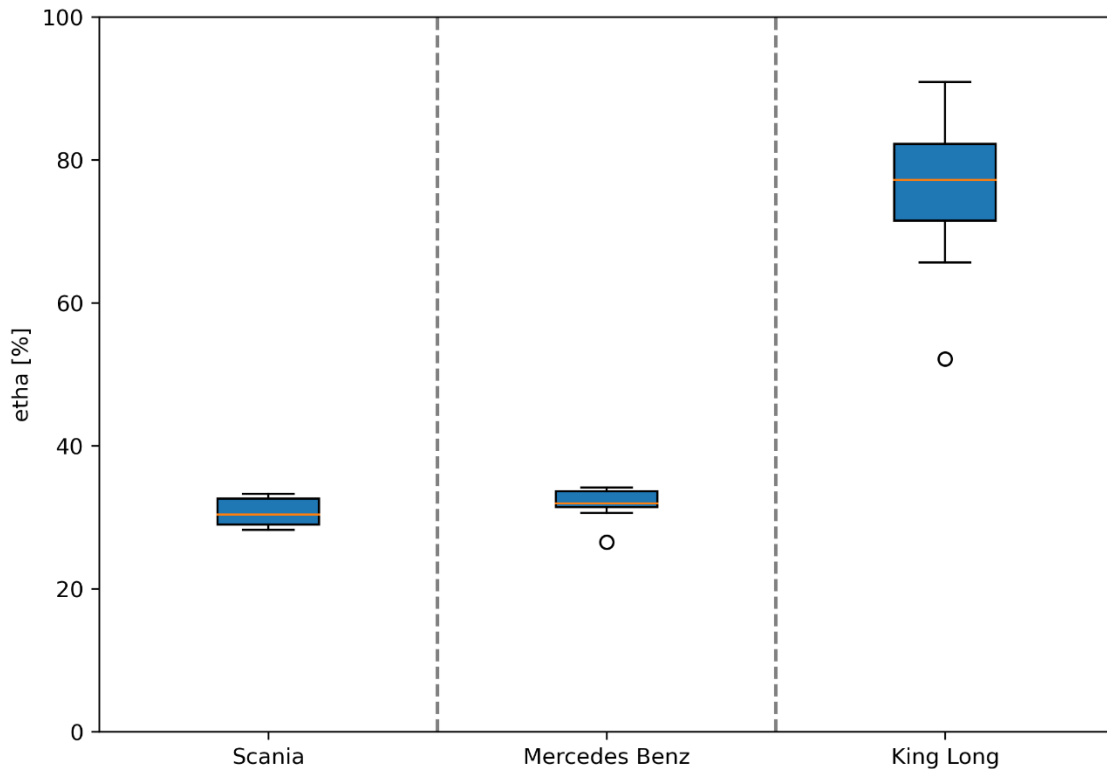


Figura 4.2:Eficiencia global

A partir del gráfico, se destaca para los autobuses Scania y Mercedes Benz la eficiencia global está en rangos de 30% a 34%, con promedios de 30,66% y 32,56%, respectivamente. Mientras tanto, King Long tiene una eficiencia de 78,45%; valor con el que destaca en comparación con los motores a combustión y cumple las expectativas de eficiencia de vehículos eléctricos con respecto a la tecnología anterior.

4.3 Factores que inciden en el consumo

Para realizar el análisis del consumo energético de la flota es necesario agregar el elemento correspondiente al modo de operación. Esto corresponde a identificar el porcentaje del tiempo en que el bus pasa en determinado estado según lo mencionado en la sección 3.6. Este resultado permite identificar elementos que inciden en el consumo energético reportado pudiendo orientar las posibles acciones. A continuación, se resumen los resultados obtenidos por tecnología y modelo en la Figura 4.3.

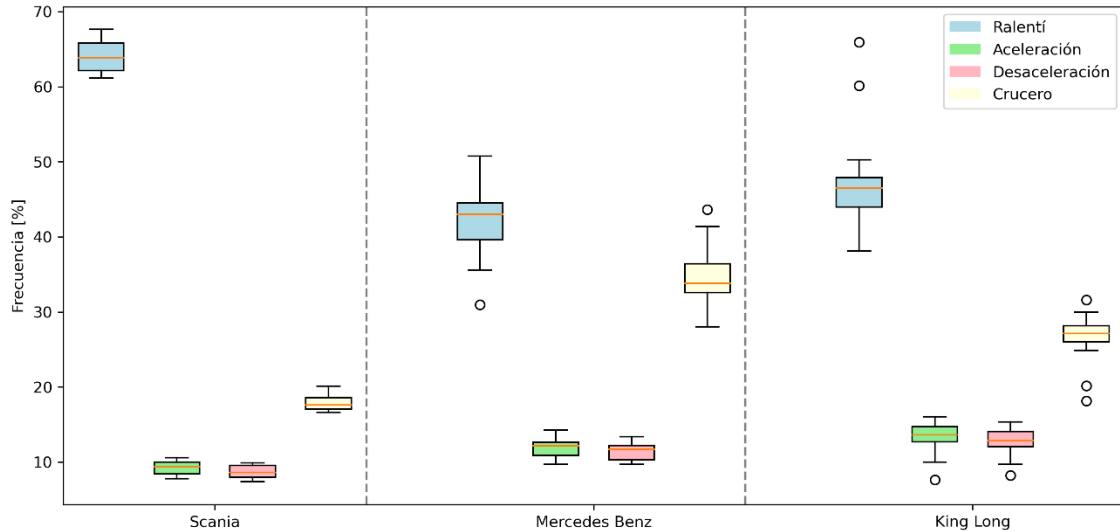


Figura 4.3: Frecuencia de uso

A partir de la metodología planteada, se determina la influencia de las variables físicas que afectan el consumo energético. A continuación, en la Figura 4.4 se presentan los resultados obtenidos.

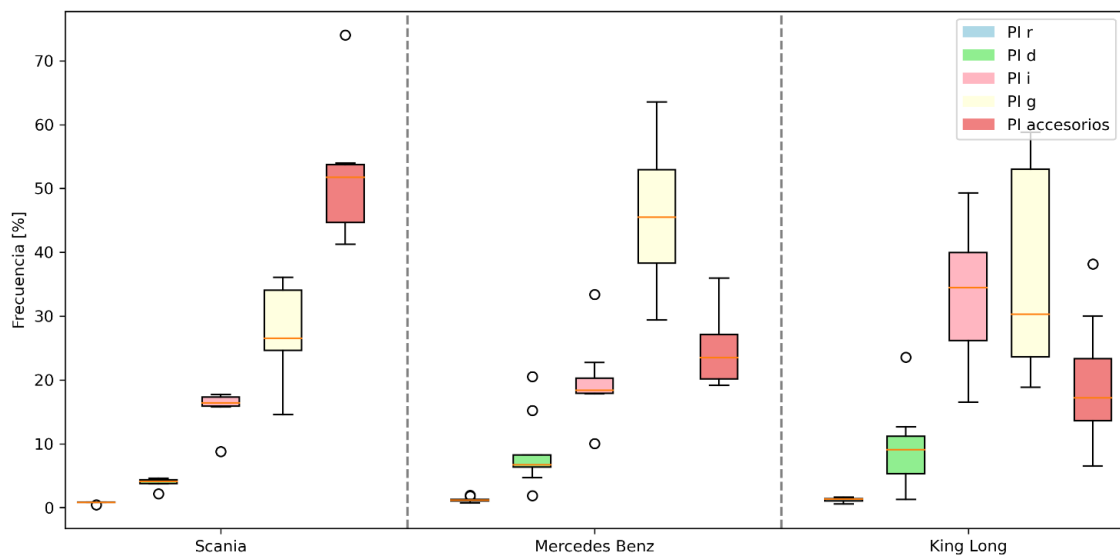


Figura 4.4: Distribución de consumo

Los resultados muestran principalmente que el consumo asociado al ralentí más accesorios, la fuerza gravitatoria y la inercia de los elementos rotantes concentran la mayor cantidad de consumo. Para el caso del bus Scania, el consumo asociado al ralentí más accesorios es en promedio de 48,29%, 23,52% en promedio para los buses Mercedes Benz y un 19,01% en promedio para los buses King Long. Sobre el consumo energético asociado a la diferencia de alturas, en promedio para los Scania alcanza un 27,37%, 46,43% para los Mercedes Benz y 36,34% para los King Long. Finalmente, el consumo energético asociado a la inercia de los elementos rotantes, en promedio para los buses Scania es de 15,44%, 19,88% para Mercedes Benz y 33,36% para los King Long.

4.4 Recomendaciones para disminuir consumo

En la presente sección se describen las estrategias recomendadas para disminuir el consumo de combustible o de energía, según sea el caso. Las siguientes recomendaciones son orientadas para la administración de la flota.

- **Tiempos de ralentí:** El alto porcentaje de tiempo en ralentí identificado indica la necesidad de prestar especial atención a su origen para reducir su proporción dentro del consumo energético determinado. Una de las posibles causas de este comportamiento es la utilización del sistema de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC por sus siglas en inglés), como climatización previa al inicio de cada viaje. Es necesario estudiar detalladamente la factibilidad técnica de las distintas alternativas, pudiendo pasar de sistemas eléctricos independientes al bus como a ventilación externa para la climatización interna.
- **Renovación de flota:** De los resultados obtenidos resalta la eficiencia global 78,45% de los buses eléctricos, con un mejor rendimiento y reducción notable de emisiones. Sin embargo, es necesario evaluar la viabilidad económica mediante un análisis del Costo Total de Operación (TCO por sus siglas en inglés), donde hay estudios que señalan que un vehículo tiene mejor TCO comparado con uno diésel[23]. Como alternativa, y analizando la eficiencia global para el caso de buses diésel, se recomienda la renovación de la flota por buses de la marca Mercedes Benz modelo O-500-RS 1936/30 por sobre de los Scania K 360 B.

El objetivo es reducir el nivel de consumo de combustible o de energía y bajar las emisiones de CO₂, fomentando así, prácticas sostenibles en el sector transporte.

4.5 Consumo comparado

Con los resultados de rendimiento energético obtenidos es posible plantear la comparación con otros estudios realizados. En la Figura 4.5 se presenta un resumen de lo recopilado según reportado [2], [5], [24]–[30] destacando que se muestran los datos correspondientes a vehículos diésel y eléctrico.

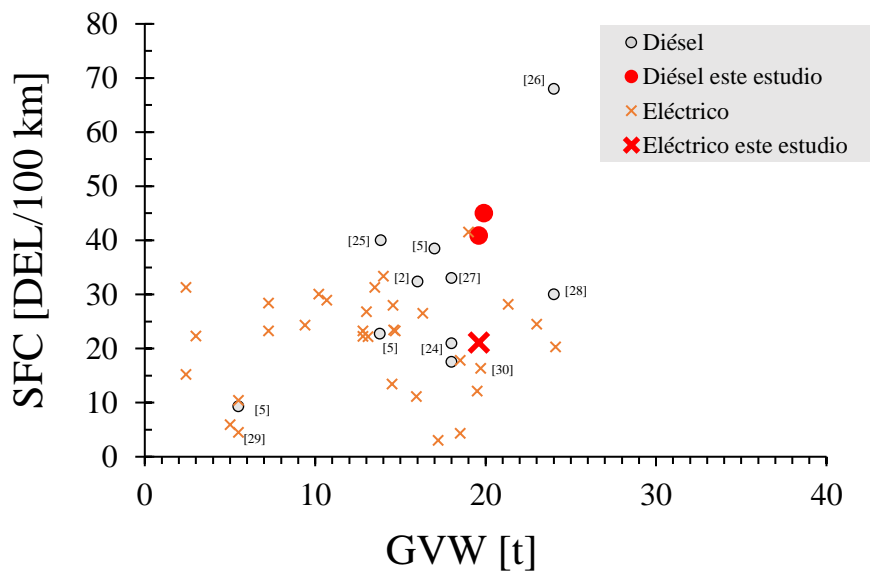


Figura 4.5: Consumo comparado con datos recopilados

Para vehículos de similares características a la del presente estudio, el rendimiento fue de 32,4 L/100km [2], 38,48 L/100km [5] considerando buses diésel. Por parte de los buses eléctricos, el caso más cercano al de estudio muestra un rendimiento de 16,35 DEL/100km [30].

4.6 Emisiones

La relación entre rendimiento y emisiones es directa. Considerar las emisiones es fomentar la elección de tecnologías más limpias y sostenibles, factor que podría beneficiar en distintos niveles en la toma de decisiones. En la Figura 4.6 se presentan los resultados obtenidos.

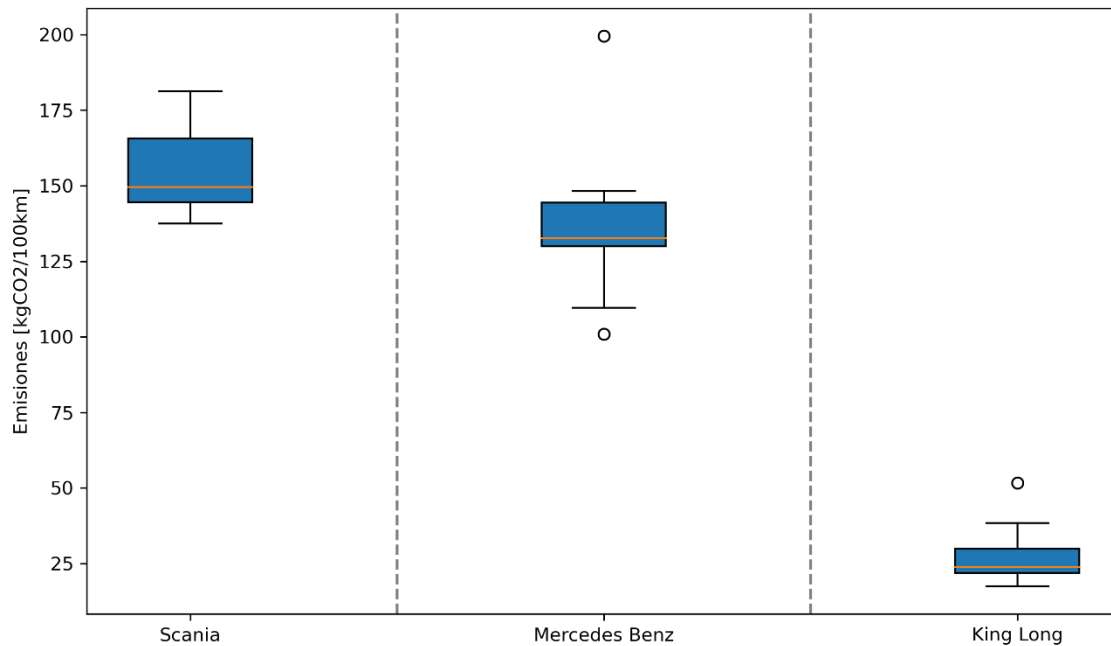


Figura 4.6: Emisiones de CO₂ cada 100 km

Los resultados obtenidos arrojan que para los buses Scania, la cantidad promedio de emisiones por cada 100 kilómetros son de 147,53 kg de CO₂, para los Mercedes Benz un promedio de 136,33 kg de CO₂ y finalmente, para los buses King Long 24,99 kg de CO₂.

4.7 Resumen

Los resultados indican que el rendimiento promedio para los buses diésel es de 43,02 L/100km y para buses eléctricos es de 130,32 kWh/100km, con una eficiencia global del 31,37% y 78,45%, para diésel y eléctrico respectivamente. Al analizar los factores que determinan el consumo, se encuentra que los más influyentes son el ralenti y las fuerzas de aceleración y superación de pendientes. A partir de ello, se concluye que las acciones que generan una mayor reducción del consumo son bajar los tiempos de ralenti y cambiar la tecnología vehicular.

A partir del consumo y factores de emisión se estima que las emisiones de CO₂ son 141,93 kg/100km para los buses diésel, en contraste de los 24,99 kg/100km para los buses eléctricos. Finalmente se encuentra que los resultados están de acuerdo con la literatura. Con esto, la correlación entre el consumo de combustible medido en comparación al estimado por el modelo entrega una correlación (R^2) de 0.99, afirmando la validez de ellos.

CAPÍTULO 5: Propuesta de servicios

El análisis de datos realizados tiene como objetivo presentar evidencia para tomar decisiones. En este capítulo se profundiza en cómo las técnicas desarrolladas para el análisis pueden ser utilizadas por empresas de telemetría. Por ello, se hace un estudio sobre los servicios ofrecidos en el mercado para luego comparar los resultados obtenidos en este estudio.

En una primera instancia se hace un análisis general sobre los servicios ofrecidos por algunas empresas de telemetría a nivel global, esto con el fin de tener una base sobre el modo de utilizar los datos. Luego, se desarrollan distintas recomendaciones de servicios utilizando principalmente los resultados obtenidos. Para los servicios propuestos existe la posibilidad de la implementación inmediata puesto que toda la información ya está obtenida o necesita algún tipo de ajuste menor. Sin embargo, se ha desarrollado parcialmente propuestas que necesitan un grado de desarrollo para ser implementadas.

El presente capítulo termina por mostrar la aplicabilidad de las habilidades desarrolladas en el presente trabajo, esto en la búsqueda de generar impacto directo en la sociedad a partir del conocimiento.

5.1 Mercado actual

Se presentan los servicios propuestos. Antes, se realizó un estudio del mercado actual, analizando los servicios ofrecidos por empresas internacionales enlistadas a continuación.

- Samsara
- Oseven
- Intellias
- WirelessCar
- Phillips

Se muestra una síntesis de servicios [31]–[35], resaltando que la elección de las empresas es una muestra elegida por la particularidad de los servicios ofrecidos.

La utilización del sistema de GPS para rastreo vehicular destaca como eje a la hora de implementar servicios. Con esto, es posible determinar el tiempo estimado para llegar a destinos, buscando mejorar la eficiencia del servicio de operación de la flota. Además, tiene la funcionalidad de conectar, controlar, monitorear y optimizar el funcionamiento de la flota, llegando a la utilización de aplicaciones para smartphone que permiten una visualización en tiempo real, con datos que son enviados a la nube.

Por otro lado, es posible reportar el estado general de la flota realizando diagnósticos remotos. Monitoreo de estado de elementos como las baterías o la presión de neumáticos. Otro servicio que destaca es la posibilidad de detectar daños a vehículos producto de accidentes viales, incluso complementándose con servicios de grabación que ayuden a tener un mejor contexto de los incidentes.

Otro servicio revisado fue calificar al conductor a partir del comportamiento vial identificando a detalle movimientos realizados. Esto se mide considerando excesos de velocidad, aceleraciones o desaceleraciones bruscas.

5.2 Servicios disponibles a partir de las habilidades desarrolladas en esta memoria.

Tomando en cuenta los servicios ofrecidos por las distintas empresas estudiadas, pero principalmente considerando la posibilidad de implementación con los resultados obtenidos, se presentan los servicios propuestos. La elección de estas propuestas de servicio considera la implementación inmediata según la información disponible.

- **Calificación por modelo de bus:** La determinación de la eficiencia global de la tecnología vehicular permite comparar entre buses. Además, se recomienda realizar pruebas experimentales para determinar parámetros relativos a coeficientes físicos, como la prueba de Coast Down para el Coeficiente de Arrastre (C_d) y Resistencia a la Rodadura (f_r), esto con el objetivo de optimizar el ajuste de los resultados de consumo energético y su posterior análisis.
- **Desempeño de conductor:** Considerando que el P_i inercial refleja la influencia de la transmisión y la aceleración en el consumo energético, se propone implementar servicios orientados a evaluar el modo de conducir de manera particular para cada conductor. Además, se recomienda complementar la evaluación añadiendo los CP's individuales comparados con el promedio.

5.3 Servicios que requieren desarrollo.

Los resultados obtenidos también entregan una idea parcial que podría ser utilizada como servicio a ofrecer, pero del que se necesita otro nivel de profundidad. A continuación, se mencionan los servicios que muestran potencial de ser implementados.

- **Reporte de GEI:** Tal como se ha mencionado, el control del consumo de combustible deriva en reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Cuantificar la disminución de GEI a partir de implementación de diferentes decisiones abre la posibilidad a comercializar mediante bonos de carbono esta reducción. Los bonos de carbono se utilizan para compensar la emisión de GEI con objetivos relativos a sostenibilidad para empresas u organizaciones, para esto se emite un bono en mercados internacionales. Para que este bono sea válido es necesario tener certificaciones de entidades como Gold Standard.
- **Sensores adicionales:** Existen elementos de especial interés al momento de analizar el consumo energético de una flota. Se realizó una comparación de la eficiencia considerando el caso de un vehículo vacío y con un 70% del peso máximo, obteniendo una diferencia cercana al 5%. Tener claridad de la cantidad de masa transportada lleva a una mejor evaluación del comportamiento de la flota. Se recomienda la instalación de nuevos sensores que permitan medir la masa transportada, velocidad del motor y consumo energético por aire acondicionado. Esto va en directo apoyo a complementar el análisis y reportar de una manera más precisa la distribución de consumo energético de la flota.

5.4 Resumen

Sintetizando los servicios que podría ofrecer una empresa de telemetría con las técnicas desarrolladas en esta memoria son: a) Calificación por modelo de bus a partir de la eficiencia global, b) Desempeño de conductor cuantificado por el Pi inercial, c) Reporte de GEI para entrar en mercados internacionales en bonos de carbono y d) Sensores adicionales para monitorear elementos claves que ayuden a perfeccionar el modelo.

La serie de propuestas anteriormente planteadas buscan incidir en el consumo energético y las emisiones de GEI, complementando lo que se realiza actualmente para entregar soluciones completas y específicas.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

Este trabajo se centró en analizar la eficiencia energética de una determinada flota de buses que opera en Chile. La muestra compuesta por buses diésel y eléctricos fue monitoreada con una duración máxima de 4 meses.

Respecto a los buses diésel se tomaron dos marcas diferente operando en dos zonas geográficas distintas, arrojando consumos más altos para los buses 700, en contraste a los buses 800 que muestran un mejor rendimiento y eficiencia. Por su parte, se analizó el rendimiento de una muestra de buses eléctricos que opera en la zona centro-sur de Chile, que al momento de comparar se sitúan en mejor posición que los buses diésel en cuanto a rendimiento, eficiencia y emisiones. Es importante destacar que los coeficientes de aerodinámica y de resistencia a la rodadura fueron elegidos a partir de la literatura, se recomienda determinar ambos valores de manera experimental, esto para ajustar el modelo de mejor manera.

Resalta la alta presencia de ralentí, siendo un ítem relevante por estudiar junto con el aporte realizado al consumo energético ligado al sistema de aire acondicionado. Es posible observar una relación en los resultados obtenidos, principalmente en el porcentaje de ralentí y su consumo energético asociado. Por otra parte, las rutas seguidas por los diferentes buses muestran coherencia respecto del consumo asociado a la diferencia de alturas, donde los buses 700 mantienen una inclinación de carretera menos pronunciada que los buses 800 y BE. En síntesis, los tres elementos más importantes asociados al consumo energético son ralentí, diferencia de las alturas en instantes consecutivos y la inercia de los elementos rotantes, donde este último está asociado a la influencia del conductor. Lo anterior indica la necesidad de realizar un estudio enfocado en disminuir los tiempos de ralentí.

Respecto del rendimiento comparado con lo reportado en estudios globales, la flota en estudio muestra en promedio un valor mayor. Lo anterior se debe principalmente por el modo de operación, esto reafirma que no es posible generalizar los resultados sin antes destacar las condiciones reales de operación.

Determinar el consumo de combustible no es el último fin del presente trabajo. Se logró identificar dos maneras para mejorar el rendimiento: Bajar tiempo de ralentí y preferir un modelo de bus. Finalmente, con el fin de utilizar los resultados para la toma de decisiones se proponen una serie de servicios. Anteriormente se comentó la diferencia en la eficiencia determinada, esto da la posibilidad de preferir un modelo de vehículo en desmedro de otro similar. Además, es posible calificar la conducción con el Pi inercial, si bien se sigue estudiando los alcances se propone continuar con el estudio con el fin de fijar un valor apropiado como como de calificación. A partir del consumo energético, las emisiones de CO₂ por parte del bus eléctrico es inferior al 20% respecto de lo emitido por los buses diésel. Esto abre la posibilidad de entrar en mercados internacionales de bonos verdes.

Este estudio demuestra la alta competitividad de los buses eléctricos en el sector transporte, siendo una alternativa viable para su implementación. A pesar de que el contexto específico en el que se desarrolla este estudio no permite generalizar, es un primer acercamiento para futuros trabajos ligados a esta área, donde ya ha habido investigaciones que demuestran que la adopción de tecnologías eléctricas para vehículos de transporte terrestre resulta incluso económicamente rentable.

Referencias

- [1] B. Cengel, “Termodinámica,” *Mc Graw Hill*, vol. 7ma, 2005.
- [2] O. Ghaffarpasand, M. R. Talaie, H. Ahmadikia, A. T. Khozani, M. D. Shalamzari, and S. Majidi, “Real-world assessment of urban bus transport in a medium-sized city of the Middle East: Driving behavior, emission performance, and fuel consumption,” *Atmos Pollut Res*, vol. 12, no. 3, pp. 113–124, 2021, doi: 10.1016/j.apr.2021.02.004.
- [3] M. Giraldo and J. I. Huertas, “Real emissions, driving patterns and fuel consumption of in-use diesel buses operating at high altitude,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 77, no. October, pp. 21–36, 2019, doi: 10.1016/j.trd.2019.10.004.
- [4] Secretaria Regional Ministerial del Medio Ambiente, “Informe Final para la Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica por Material Particulado Respirable -MP10 y MP2 , 5-,” p. 45, 2018.
- [5] O. S. Serrano-Guevara, J. I. Huertas, L. F. Quirama, and A. E. Mogro, “Energy Efficiency of Heavy-Duty Vehicles in Mexico,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 1, 2023, doi: 10.3390/en16010459.
- [6] T. D. Gillespie, “Fundamentals of Vehicle Dynamics,” *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, 1992, doi: 10.4271/r-114.
- [7] R. Jazar, *Vehicle Dynamics Theory and Application*. 2008. doi: 10.4271/620572.
- [8] M. Ploechl and G. Mastinu, *Road and Off-Road Vehicle System Dynamics Handbook*.
- [9] TomTom, “Santiago traffic.” <https://www.tomtom.com/traffic-index/santiago-traffic/> (accessed Apr. 04, 2023).
- [10] “Nosotros – Inway.” <https://www.inway.cl/nosotros/> (accessed Apr. 04, 2023).
- [11] Gobierno de Chile, “Nuestro país.” <https://www.gob.cl/nuestro-pais/>
- [12] Dirección de vialidad, “Red vial nacional dimensionamientos y características 2022,” 2021.
- [13] M. I. Jamadar, S. S. Shainde, F. J. Badshah, S. S. Sawant, and R. J. Gundla, “Review on Electric Vehicle Transmission System,” vol. 7, no. 4, pp. 2125–2129, 2020, [Online]. Available: www.jetir.org
- [14] Ministerio de Salud, “Informe Encuesta Nacional de Salud 2016-2017, Estado Nutricional.,” *Departamento de Epidemiología, División de Planificación Sanitaria, Subsecretaría de Salud Pública*, vol. 26, no. 1, pp. 20–28, 2018, [Online]. Available: https://www.junaeb.cl/wp-content/uploads/2021/03/MapaNutricional2020_.pdf%0Ahttps://goo.gl/oe2iVt
- [15] W. H. Hucho, “Aerodynamics of Road Vehicles,” *Society of Automotive Engineers (SAE)*, vol. 4th editio, 1998.

- [16] EPA, “Vehículos todo eléctrico.” <https://www.fueleconomy.gov/feg/esevtech.shtml> (accessed Apr. 04, 2023).
- [17] J. I. Huertas, O. Serrano-Guevara, J. Díaz-Ramírez, D. Prato, and L. Tabares, “Real vehicle fuel consumption in logistic corridors,” *Appl Energy*, vol. 314, no. March, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118921.
- [18] L. Lin and P. D. Sherman, “Cleaning Data the Chauvenet Way,” *SESUG 2007: The Proceedings of the SouthEast SAS Users Group*, no. c, pp. 1–11, 2007.
- [19] CONUEE, “Lista De Combustibles 2020 Que Se Considerarán Para Identificar a Los Usuarios Con Un Patrón De Alto Consumo, Así Como Los Factores Para Determinar Las Equivalencias En Términos De Barriles Equivalentes De Petróleo,” *Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía*, pp. 1–3, 2020, [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/302306/Lista_de_combustibles_2018.pdf
- [20] DBEIS and DEFR, “Greenhouse Gas Reporting: Conversion Factors 2021,” 2022.
- [21] Ministerio de Energia, “Factor de emisión.” <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/> (accessed Apr. 04, 2023).
- [22] Ministerio del Medio Ambiente, “Informe del Inventario Nacional de Chile 2020. Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes 1990-2018,” 2020, [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/7305681_Chile-BUR4-1-2020_IIN_CL.pdf
- [23] J. I. Huertas, A. E. Mogro, and J. P. Jiménez, “Configuration of Electric Vehicles for Specific Applications from a Holistic Perspective,” 2022.
- [24] ICCT, “Second-Phase Fuel Economy Standards for On-Road Heavy-Duty Vehicles in Japan,” *International Council on Clean Transportation*, no. JANUARY, p. 5, 2019, [Online]. Available: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Japan_HDV_FE_Phase_2_20190129.pdf
- [25] L. F. Quirama, M. Giraldo, J. I. Huertas, and M. Jaller, “Driving cycles that reproduce driving patterns, energy consumptions and tailpipe emissions,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 82, no. March, p. 102294, 2020, doi: 10.1016/j.trd.2020.102294.
- [26] E. Chikishev and D. Chainikov, “Assessment of External Factors Influence on the Fuel Consumption of a Diesel Bus Operating on a City Route,” *Transportation Research Procedia*, vol. 61, pp. 354–360, 2022, doi: 10.1016/j.trpro.2022.01.057.
- [27] S. Zhang *et al.*, “Real-world fuel consumption and CO2 emissions of urban public buses in Beijing,” *Appl Energy*, vol. 113, pp. 1645–1655, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.017.
- [28] A. Gómez *et al.*, “Comparison of real driving emissions from Euro VI buses with diesel and compressed natural gas fuels,” *Fuel*, vol. 289, no. x, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119836.

- [29] dewesoft, “Evaluación del consumo de energía en minibús eléctrico,” 2022. <https://dewesoft.com/es/blog/evaluacion-del-consumo-energetico-de-un-minibus-electrico>
- [30] International Council on Clean Transportation, “Estrategia para el despliegue de flota eléctrica en el Sistema de Corredores de Transporte Público de Pasajeros de la Ciudad de México ‘Metrobús’: Líneas 3 y 4,” 2022, [Online]. Available: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/03/MexCity-ZEBRA-A4-v4-may22.pdf>
- [31] WirelessCar, “Shared Mobility.” https://www.wirelesscar.com/solutions/shared-mobility/?_gl=1*tmvi6r*_up*MQ..&gclid=Cj0KCQjwjryjBhD0ARIsAMLvnF-KoolZdi8W61TUrOI1gtNN28_BIBSDFUYCoVNqTT8Ht-nl8_MD0jMaAnrsEALw_wcB (accessed Jun. 09, 2023).
- [32] Intellias, “Transportation.” <https://intellias.com/transportation/> (accessed Jun. 09, 2023).
- [33] Samsara, “Transportation & logistics.” <https://www.samsara.com/industries/logistics/> (accessed Jun. 09, 2023).
- [34] Oseven, “Products.” <https://oseven.io/products/> (accessed Jun. 09, 2023).
- [35] Phillips connect, “Our products.” https://www.phillips-connect.com/our-products?utm_source=mv&utm_medium=paid&utm_campaign=intent&customer_id=50106894&gclid=CjwKCAjw4ZWkBhA4EiwAVJXwqVvVaceHNjuLfXZ2iWFmXu_LzfMwkCw8HMv-IWr6YEr-9p_f3ebsghoCWd4QAvD_BwE&glsrc=aw.ds (accessed Jun. 09, 2023).

Anexo A: Carta Gantt

Objetivos		Actividades	Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				
			S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	
Eficiencia energética en flota vehicular	Determinar los coeficientes que ajustan el modelo de consumo	Determinar coeficientes para el modelo	■	■	■	■	■	■	■	■													
		Afinar modelo			■	■	■	■	■	■	■	■											
		Analizar resultados											■	■	■	■							
		Categorizar resultados para comparar													■	■							
	Agregar consumos en ralentí y de accesorios al modelo	Analizar por separado el consumo de ralentí y accesorios						■	■	■													
		Determinar un modelo que permita determinar consumo por ralentí y accesorios							■	■						■	■						
		Implementar en el modelo para cada viaje								■	■	■	■	■	■	■	■						
	Determinar los factores más importantes en el consumo de	Ajustar modelo									■	■	■	■	■	■	■						
		Resumir importancia por categoría										■	■	■	■	■	■						
	Identificar estrategias que busquen disminuir el consumo de combustible	Ordenar por importancia													■	■	■	■					
		Establecer criterios													■	■	■	■					
		Justificar estrategias														■	■	■	■				
	Comparar el consumo de combustible con países de latinoamerica	Seleccionar viajes a comparar															■	■					
		Establecer criterios de comparación															■	■					
		Condensar resultados															■	■					
	Identificar nuevos servicios para empresas de telemetría	Analizar el mercado																■	■				
		Identificar posibilidades a partir del trabajo realizado																	■	■			
		Seleccionar posibles servicios																		■	■		

Anexo B: Especificaciones técnicas de la flota

(1) O 500 RS 1936 4x2, año 2021

Motor	Modelo	MB OM 457 LA
	Cilindros	6 cilindros verticales en línea
	Volumen [L]	12
	Potencia	354 cv (260 kW) a 2000 rpm
Vehículo	Cantidad de asientos	49
	Carga máxima [kg]	19600
	Dimensiones (LxAxA) [mm]	10780 x 3731 x 2550
Ruedas	Neumáticos	295/80 R 22.5
Transmisión	1°	3.36
	2°	1.91
	3°	1.42
	4°	1.00
	5°	0.72
	6°	0.62
	Retroceso	9.84
	Diferencial	4.30

(2) K 360 IB 4x2, año 2020

Motor	Modelo	Scania DC13
	Cilindros	
	Volumen [L]	13
	Potencia	360 hp (265 kW) a 1900 rpm
Vehículo	Cantidad de asientos	49
	Carga máxima [kg]	19500
	Dimensiones (LxAxA) [mm]	
Ruedas	Neumáticos	295/80 R 22.5
Transmisión	1°	9.17:1
	2°	6.26:1
	3°	4.65:1
	4°	3.75:1
	5°	2.45:1
	6°	1.67:1
	7°	1.24:1
	8°	1.00:1
	Retroceso	11.00:1
Diferencial	3.07:1	

(3) XMQ6130EYWE5

Motor	Modelo	Motor síncrono de imanes permanentes
	Potencia	350 kW
Vehículo	Cantidad de asientos	42
	Carga máxima [kg]	19500
	Dimensiones (LxAxA) [mm]	12600 x 2600 x 3690
Ruedas	Neumáticos	295/80 R 22.5

Anexo C: Parámetros característicos de la flota

(1) Buses diésel

	AveSpeed	DesvStdSpeed	MaxSpeed	AveAccelPos	AveAccelNeg	Ralenti	Aceleración	Desaceleración	Crucero	SFC	etha	Π_e	Π_g	Π_h	Π_p	$\Pi_{\text{operarios}}$
700 Scania	20.27	27.71	80.00	0.37	-0.44	61.90	9.41	8.59	20.10	40.93	33.24	0.86	4.61	15.77	28.40	50.36
780 Scania	14.87	24.56	99.00	0.41	-0.46	64.91	9.40	8.63	17.06	45.64	30.76	0.79	3.90	17.52	24.61	53.17
782 Scania	16.10	26.49	99.00	0.43	-0.46	66.11	8.11	7.77	18.02	43.46	28.20	0.44	2.15	8.77	14.59	74.06
783 Scania	16.56	26.20	80.00	0.43	-0.56	67.64	7.80	7.37	17.18	42.92	33.14	0.79	4.43	16.18	24.67	53.93
785 Scania	19.11	25.64	81.00	1.06	-0.94	61.16	10.16	9.88	18.81	53.96	28.64	0.81	3.73	16.67	36.07	42.73
786 Scania	18.82	26.21	83.00	0.39	-0.42	62.87	10.59	9.92	16.62	50.55	29.95	0.85	4.25	17.74	35.90	41.26
808 Mercedes Benz	42.98	41.48	103.00	0.31	-0.37	35.60	10.81	9.96	43.64	30.06	31.75	1.93	20.51	22.75	31.32	23.50
845 Mercedes Benz	29.81	27.42	113.00	0.49	-0.54	44.54	12.95	12.19	30.32	44.15	33.64	1.02	4.69	17.92	52.91	23.46
847 Mercedes Benz	43.16	35.01	104.00	0.66	-0.74	30.96	14.26	13.37	41.40	32.64	30.59	1.82	15.20	33.40	29.41	20.17
849 Mercedes Benz	18.53	17.51	100.00	0.41	-0.43	48.00	9.68	9.69	32.63	59.43	34.16	0.77	1.85	10.05	63.53	23.80
851 Mercedes Benz	24.73	27.45	101.00	0.62	-0.67	43.21	12.47	11.73	32.59	39.48	26.51	1.10	6.35	18.43	42.79	31.33
852 Mercedes Benz	32.56	29.65	104.00	0.50	-0.55	41.30	12.64	12.24	33.82	38.68	31.91	1.27	8.27	20.26	51.05	19.14
853 Mercedes Benz	31.85	28.48	102.00	0.47	-0.53	42.99	11.89	11.24	33.88	41.30	33.87	1.16	6.38	17.84	54.96	19.66
860 Mercedes Benz	33.99	29.45	109.00	0.50	-0.55	39.60	12.18	11.78	36.43	39.04	32.80	1.15	7.84	18.40	45.49	27.13

(2) Buses eléctricos

	Ave Speed [km/h]	Desv Std Speed [km/h]	Max Speed [km/h]	Ave Accel Pos [%]	Ave Accel Neg [%]	Ralenti [%]	Aceleración [%]	Desaceleración [%]	Crucero [%]
BE-1 King Long	29.71	34.31	105.00	0.65	-0.64	46.97	13.58	13.11	26.35
BE-2 P1 King Long	26.40	31.57	104.00	0.69	-0.71	45.98	14.23	13.89	25.90
BE-2 P2 King Long	27.32	31.47	104.00	0.67	-0.71	43.39	14.90	14.15	27.56
BE-3 P1 King Long	19.66	26.28	103.00	0.55	-0.55	60.14	9.99	9.69	20.18
BE-5 King Long	33.26	36.72	104.00	0.61	-0.69	46.03	13.96	13.07	26.94
BE-6 P1 King Long	23.35	25.82	104.00	0.51	-0.53	47.93	12.70	12.04	27.33
BE-6 P2 King Long	23.31	26.28	104.00	0.51	-0.54	50.25	12.71	12.17	24.87
BE-7 P1 King Long	28.28	33.87	104.00	0.65	-0.67	47.75	11.29	10.97	30.00
BE-7 P2 King Long	31.99	34.32	104.00	0.54	-0.61	45.75	13.71	12.35	28.19
BE-8 King Long	38.59	36.86	104.00	0.58	-0.66	38.14	16.05	14.23	31.58
BE-9 P1 King Long	12.55	17.39	57.00	0.67	-0.62	65.93	7.66	8.24	18.16
BE-10 P1 King Long	27.92	27.07	104.00	0.50	-0.53	39.91	15.99	15.33	28.77
BE-10 P2 King Long	26.95	26.71	103.00	0.53	-0.54	41.27	15.42	15.27	28.04