

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE LIMA”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

INGENIERO AMBIENTAL

CRISTHIAN ELOY ABANTO VILCA

Lima – Perú

2024

La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)

TSP_ing_ambiental_huella

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

7%

★ hdl.handle.net

Fuente de Internet

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Activo

Dr Alexis Nicolás Ibáñez Blancas
Asesor

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
EN EL TRANSPORTE PÚBLICO DE LIMA”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

CRISTHIAN ELOY ABANTO VILCA

Sustentada y aprobado por el siguiente jurado:

Ph.D. Diego Alejandro Sotomayor Melo
PRESIDENTE

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro
MIEMBRO

Mg.Sc. Armando Javier Aramayo Bazzetti
MIEMBRO

Dr. Alexis Nicolás Ibáñez Blancas
ASESOR

DEDICATORIA

A mi padres y hermana, por su apoyo incondicional y optimismo perpetuo

AGRADECIMIENTOS

A la empresa consultora DEUMAN y su Gerente General por enseñarme a ver un mundo de oportunidades y darme la confianza necesaria para ir a buscarlas disfrutando del proceso y aprovechando mi formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Gases de Efecto Invernadero	4
2.2. Factores de emisión.....	4
2.3. Rendimiento.....	6
2.4. Rendimiento Energético	7
2.4.1. Diesel y Gas Natural Vehicular.....	7
2.4.2. Combustible DB5	8
2.4.3. Bus Eléctrico	8
2.5. Cálculo de factores de emisión de GEI	9
2.5.1. Diesel y Gas Natural Vehicular.....	9
2.5.2. Combustible DB-5.....	9
2.5.3. Bús Eléctrico	10
2.6. Variables que afectan el calculo de los factores de emisión	11
III. DESARROLLO DEL TRABAJO	13
3.1. Contexto Laboral	13
3.1.1. Responsabilidades	13
3.1.2. Contribución profesional	14
3.2. Ambito de Evaluación.....	15
3.2.1. Ruta 107-Corredor Amarillo	15
3.2.2. Ruta 201-Corredor Rojo	19
3.2.3. Ruta 4515.....	22
3.3. Abordaje de variables que afectan el consumo de combustible	25
3.4. Procedimiento de toma de muestra	27
3.5. Campaña de Mediciones	30

3.5.1. Campaña en Blanco	31
3.5.2. Campaña de Mediciones	33
3.5.3. Reprogramaciones	35
3.6. Tratamiento de Datos	38
3.6.1. Valores Atípicos	39
3.6.2. Intervalos de Confianza	39
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1 Resultados principales por bus	41
4.2 Por tipo de combustible en cada ruta	42
4.2.1. Análisis de rendimiento y rendimiento energético	44
4.2.2. Factor de emisión (FE) de GEI	45
4.3 Por tipo de combustible	50
4.4 Análisis de mediciones en Blanco	53
4.5 Discusión de resultados	56
4.5.2. Rendimiento Energético	56
4.5.3. Factores de emisión	57
4.6 Utilidad de los resultados	58
V. CONCLUSIONES	60
VI. RECOMENDACIONES	61
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potencial de Calentamiento Global	6
Tabla 2: Poder Calorífico	7
Tabla 3: Factor de emisión (kg/GJ) Tier 1 del IPCC 2006	9
Tabla 4: Factor de emisión del sistema eléctrico interconectado nacional (SIEN) - 2019	11
Tabla 5: Pérdida por transmisión y distribución - 2018.....	11
Tabla 6: Variables que afectan el consumo de Combustible.....	12
Tabla 7: Ficha técnica de la Ruta 107	16
Tabla 8: Ficha técnica de la Ruta 201	19
Tabla 9: Ficha técnica de la Ruta 4515	22
Tabla 10: Pesos netos (kilogramos) de los buses.....	25
Tabla 11: Mediciones en la semana en blanco	32
Tabla 12: Cumplimiento de buses en la medición en blanco	33
Tabla 13: Cantidad de mediciones de acuerdo a la ruta y combustible según los TdR.....	33
Tabla 14: Calendario preliminar de mediciones	34
Tabla 15: Cumplimiento de los buses en la primera medición	35
Tabla 16: Cumplimiento de los buses en la segunda medición.....	35
Tabla 17: Reprogramaciones para alcanzar el Cumplimiento de mediciones planificadas	37
Tabla 18: Cumplimiento final de los buses en las mediciones.....	38
Tabla 19: Principales datos de las mediciones en hora pico mañana y tarde	41
Tabla 20: Datos principales del monitoreo de buses en horario pico – Por ruta.....	43
Tabla 21: Rendimiento y rendimiento energético de buses en horario pico – Por ruta.....	44
Tabla 22: Factores de emisión de GEI de buses en hora pico - Por ruta	46

Tabla 23: Rendimiento y factores de emisión GEI de buses en hora pico - Por tipo de combustible.....	51
Tabla 24: Promedio de N° de pasajeros, distancia, tiempo y velocidad -Por ruta.....	52
Tabla 25: Indicador de consumo por pasajero por ruta.....	53
Tabla 26: Indicador promedio de consumo por pasajero por tipo de combustible.....	54
Tabla 27: Resultado de rendimiento y factores de emisión de GEI para buses en blanco – Por combustible	55

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la Ruta 107	18
Figura 2. Estación de carga del bus eléctrico	20
Figura 3. Ubicación de la Ruta 201	21
Figura 4. Ubicación de la Ruta 4515	24
Figura 5. Modelos de buses y año de fabricación de los buses diésel (izquierda) y GNV (derecha).....	27
Figura 6. Ficha Técnica.....	29
Figura 7. Campañas de mediciones	31
Figura 8. Rendimiento y rendimiento energético de buses en horario pico – Por ruta	45
Figura 9: Factores de emisión en gCO ₂ /km para buses en horario pico - Por ruta.....	47
Figura 10. Factores de emisión de gCH ₄ /km y gN ₂ O/km para buses en horario pico – Por ruta.....	48
Figura 11. Factor de emisión promedio (kg CO ₂ eq/km) de buses en hora pico – Por ruta.....	49
Figura 12. Contribución de los GEI al factor de emisión promedio (kg CO ₂ eq/km) en hora pico – Por ruta.....	50
Figura 13. Factor de emisión y rendimiento energético por tipo de combustible	51
Figura 14. Factores de emisión de GEI (kgCO ₂ /km) para buses en hora pico sin pasajeros - Por tipo de combustible	55
Figura 15. Factor de emisión de GEI per cápita (gCO ₂ /km*persona) – Por combustible	56

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Determinación del Rendimiento de un bus	6
Ecuación 2: Ejemplo de determinación del rendimiento	7
Ecuación 3: Determinación del rendimiento energético de buses a diésel y GNV	7
Ecuación 4: Determinación del rendimiento energético de buses a DB-5.....	8
Ecuación 5: Determinación del rendimiento energético del bus eléctrico	8
Ecuación 6: Determinación del factor de emisión de buses a diésel y GNV	9
Ecuación 7: Determinación del factor de emisión de buses a DB-5.....	10
Ecuación 8: Determinación del factor de emisión del bus eléctrico.....	10
Ecuación 9: Determinación del factor de emisión de CO ₂ equivalente	11
Ecuación 10: Intervalos de confianza	40

RESUMEN

El panel intergubernamental de cambio climático (IPCC) anunció que los compromisos climáticos mundiales conocidos como NDC no son suficientes y en el Perú tenemos 62 medidas de mitigación de las cuales 2 de ellas son específicas al transporte público de Lima donde se promueve el uso de combustibles más limpios como el Gas natural vehicular. Sin embargo, este trabajo pretende demostrar que el GNV contribuye con mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que sus competidores energéticos (Diesel, Diesel DB5 y electricidad) por lo que se busca analizar estas emisiones a partir de los rendimientos energéticos demostrando por consecuencia los beneficios de la electromovilidad. Actualmente, las estimaciones de GEI se realizan, en su mayoría, utilizando factores de emisión estándar o “TIER 1”. Con la finalidad de mejorar la confiabilidad de los resultados, se determinó la necesidad de hacer mediciones de campo para lo cual se diseñó una campaña de mediciones teniendo en cuenta aquellas variables que afectan el consumo de combustible utilizando 31 buses de propiedad del conglomerado Allin Group administradores de las rutas 201, 107 y 4515. La selección estuvo compuesta de 1 bus eléctrico, 5 buses diésel y 5 buses a GNV en el corredor rojo (ruta 201); 5 buses diésel y 5 buses GNV en el corredor amarillo (ruta 107) y 5 buses diésel y 5 GNV en el corredor Santa Rosa (ruta 4515). Los resultados de los factores de emisión muestran valores de 1.12 kgCO₂eq/km para el GNV siendo un 10% mayor frente al diésel (1.01 kgCO₂eq/km), 14% mayor frente al DB-5 (0.96 kgCO₂/km) y 84% mayor frente al bus eléctrico (0.18 kgCO₂eq/km) de forma similar el rendimiento energético del motor eléctrico de 273.53 Km/Gj frente al GNV con un valor de 54.68 Km/GJ siendo el combustible de menor rendimiento energético. Estos resultados son producto del mayor torque y el menor número de revoluciones de los motores Diesel en comparación a los motores que utilizan GNV dando paso a un menor consumo de combustible y por lo tanto mayores rendimientos.

Palabras Clave: Emisiones de gases de efecto Invernadero, Factores de Emisión, Gas Natural Vehicular, Rendimiento Energético.

ABSTRACT

The intergovernmental panel on climate change (IPCC) announced that the global climate commitments known as NDC are not enough and in Peru we have 62 mitigation measures of which 2 of them are specific to public transportation in Lima where the use of low emission fuel is promoted like natural gas; However, this work aims to demonstrate that NDC contributes a greater amount of greenhouse gas emissions than its fuel competitors (Diesel, Diesel DB5 and electricity), which is why it seeks to analyze these emissions based on energy yields, thereby demonstrating the benefits of electromobility. Currently, GHG estimates are mostly made using standard or “TIER 1” emission factors. In order to improve the reliability of the results, the need to make field measurements was determined, for which a measurement campaign was designed taking into account those variables that affect fuel consumption using 31 buses owned by the conglomerate Allin Group administrators. of routes 201, 107 and 4515. The selection was made up of 1 electric bus, 5 diesel buses and 5 CNG buses in the red corridor (route 201); 5 diesel buses and 5 CNG buses in the yellow corridor (route 107) and 5 diesel buses and 5 CNG buses in the Santa Rosa corridor (route 4515). The results of the emission factors show values of 1.12 kgCO₂eq/km for CNG, being 10% higher compared to diesel (1.01 kgCO₂eq/km), 14% higher compared to DB-5 (0.96 kgCO₂/km) and 84% higher compared to the electric bus (0.18 kgCO₂eq/km), similarly the energy performance of the electric motor of 273.53 Km/Gj compared to CNG with a value of 54.68 Km/GJ, being the fuel with the lowest energy performance.

Keywords: Greenhouse gas emissions, Emission Factors, Natural Gas Vehicles, Energy Performance

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

De acuerdo con el Sexto Informe de Evaluación (AR6, por sus siglas en inglés) del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2022) se evidencia que los esfuerzos mundiales declarados en las contribuciones nacionalmente determinadas (NDC) no son suficientes para evitar el incremento de la temperatura media global supere los 1,5°C. Muchos países al igual que el Perú han establecido y comprometido sus contribuciones nacionalmente determinadas que incluyen un paquete de 62 medidas de mitigación de las cuales 8 medidas son relativas al transporte público urbano a nivel nacional promoviendo en su conjunto un sistema de transporte de bajas emisiones donde se busca reemplazar el energético utilizado o aumentar la eficiencia del sistema en el país. Sin embargo algunas de estas medidas como la medida número 25 “Implementación de los Corredores Complementarios del Sistema Integrado de Transporte de Lima” así como la medida 26 relativa a la operación y ampliación del Metropolitano buscan promover el uso del gas natural vehicular (GNV) como medida para reducir la contaminación local y la emisión de gases de efecto invernadero.

Este trabajo pretende demostrar a través de los rendimientos energéticos, que la cantidad de gases de efecto invernadero que aportan los buses a gas natural (GNV) en comparación con los buses a Diésel B5 es mayor. A pesar de que la migración de diésel B5 a GNV permite la disminución de contaminantes locales no tiene el mismo efecto en los gases de efecto invernadero (SPEIRS et Al., 2020). Esto significa que las medidas 25 y 26 en particular al promover el uso de gas natural vehicular no reducen las emisiones de gases de efecto invernadero contribuyendo así con la lucha frente al cambio climático dejando por consecuencia a la movilidad eléctrica como una mejor opción tecnológica y energética para el transporte público en el Perú.

Para demostrar los beneficios de la electromovilidad en el transporte público frente al uso de Diésel B-5 y gas natural vehicular (GNV) se requiere cuantificar los rendimientos energéticos (cantidad de energía consumida por distancia recorrida medida en Giga-Joules

por kilómetro) en la operación de buses que operen con estos 3 energéticos (DB5, GNV y Electricidad). Así mismo, para cuantificar el potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se requiere determinar los factores de emisión específicos para la realidad de Lima Metropolitana.

Actualmente, las estimaciones de las emisiones de gases de efecto invernadero se realizan, en su mayoría, utilizando factores de emisión estándar o por defecto dado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) que siguen un nivel metodológico 1 o “TIER 1”. Con la finalidad de reducir incertidumbres en la metodología y/o mejorar la confiabilidad de los resultados, es necesario hacer mediciones de rendimiento reales bajo condiciones habituales de operación para determinar los factores de emisión más específicos. Para realizar las mediciones se requiere una metodología que facilite una comparación consistente que evite y controle todas las variables que puedan causar un aumento o disminución del consumo de combustible y/u otras incertidumbres en las mediciones; las cuales han sido incorporadas en la metodología de trabajo.

En ese sentido, el presente Trabajo de Suficiencia Profesional, detalla el procedimiento realizado para el desarrollo metodológico de la campaña de mediciones y el análisis de los resultados que permitan evaluar los rendimientos energéticos asociados al GNV, DieselB5 y la electricidad. Así como sus emisiones de gases de efecto invernadero asociadas en el ámbito del transporte público en Lima Metropolitana para demostrar que el GNV contribuye mayor cantidad de GEI que sus competidores. Esto demuestra que la movilidad eléctrica es la mejor alternativa para la reducción de emisiones GEI en el transporte público del país. En este trabajo se aplicaron los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Ambiental en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) relacionados a las emisiones de GEI: su caracterización, análisis y gestión

En ese sentido el presente trabajo tiene por objetivo principal Evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero de 3 sistemas energéticos (GNV, Diesel, Electricidad) utilizados en el transporte público de la Ciudad de Lima; y cuyos objetivos específicos son: i) Determinar el factor de Emisión Específico de 3 Energéticos (GNV, Diesel DB5 y electricidad) usados como combustibles para el transporte público de la ciudad de Lima Metropolitana ii) Cuantificar los rendimientos energéticos (cantidad de energía consumida por distancia recorrida medida en Giga-Joules por kilómetro) en la operación de buses que operen con estos 3 energéticos (GNV, Diesel DB5 y electricidad). iii) Sugerir un grupo de medidas y

acciones para mejorar la información y consecuentemente las decisiones de planificación del transporte respecto a la movilidad eléctrica en el país.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Gases de Efecto Invernadero

Los gases de efecto invernadero (GEI) hacen referencia al conjunto de gases, ya sea naturales o antropogénicos, que absorben y emiten radiación; los de origen antropogénico son los responsables de exacerbar el calentamiento global y son el principal foco de atención. Los GEI son los siguientes: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃), hexafluoruro de azufre (SF₆), trifluoruro de nitrógeno (NF₃) hidrofluorocarbonos (HFC) y perfluorocarbonos (PFC); cada uno de estos gases posee diferente potencial de calentamiento. (IPCC, 2006).

El transporte público terrestre libera emisiones de gases de efecto invernadero producto de la quema del combustible en los motores de las unidades de transporte, así como también liberan emisiones fugitivas producto de la conversión catalítica, evaporación del combustible, desgaste de frenos, neumáticos y carreteras. El cálculo de las emisiones de GEI representa la suma de las emisiones de los diferentes GEI emanados por los combustibles; en este caso, el transporte libera CO₂, CH₄ y N₂O los cuales serán materia de análisis del presente estudio.

2.2. Factores de emisión

Para el uso de factores de emisión de GEI existen diferentes niveles metodológicos o comúnmente conocidos como “tier” (por su traducción al inglés comúnmente utilizada) que se pueden aplicar para determinar la cantidad de gases de efecto invernadero, la elección de uno u otro método dependerá básicamente de los datos de actividad con los que se cuente. A continuación, se explicará a detalle cada contaminante asociado según la Guía Metodológica del IPCC para la elaboración de inventarios nacionales de GEI (IPCC, 2006).

Las emisiones de dióxido de carbono provienen principalmente de la quema de combustibles. El cálculo de emisiones, por ende, el tipo de factor de emisión a usar dependen del nivel o método TIER:

- **Nivel 1:** Estos factores de emisión son valores por defecto que da el IPCC y cuya unidad es kgCO₂/TJ.
- **Nivel 2:** Es un nivel similar al nivel 1 con la diferencia de un grado mayor de especificidad porque se requiere conocer el contenido de carbono del combustible específico del país. Estos factores de emisiones se expresan como kgCO₂/TJ. Para el caso del gas natural el Perú ha estimado un factor de emisión tipo tier 2.

Las emisiones de metano y óxido nitroso provienen del transporte terrestre propiamente dicho. Dependiendo del nivel o método TIER que se desee aplicar, se presenta los siguientes factores de emisión:

- **Nivel 1:** Estos factores de emisión son valores por defecto que se obtienen del IPCC, basados en el combustible y cuya unidad del factor de emisión es kgCH₄/TJ o kgN₂O/TJ.
- **Nivel 2:** Factores de emisión también por defecto Se basa en el tipo de combustible y que aplica cuando se conocen datos específicos de las subcategorías de vehículos, expresado en kgCH₄/TJ o kgN₂O/TJ. Las subcategorías de vehículos se basan en el tipo, la antigüedad y la tecnología de control de emisiones del vehículo.
- **Nivel 3:** Factor de emisión específico por país y se calcula por niveles de actividad del vehículo como los kilómetros recorrido por el vehículo (KRV) para cada subcategoría de vehículo y posible tipo de carretera. Se expresa en kgCH₄/TJ o kgN₂O/TJ.

Para ambos casos (emisiones de CO₂ y de CH₄ y N₂O), solo se tiene factores de emisión por defecto proporcionado por la Guía Metodológica de la IPCC. En base a ello, se calcula un nuevo factor de emisión donde se añade la variable de rendimiento energético (medido en campo) para disminuir las incertidumbres que genera el ciclo de conducción en una ciudad, como es el caso de Lima Metropolitana.

Por ello se seleccionó el nivel metodológico Tier 1 para el CO₂, CH₄ y N₂O en unidades de masa de gas de efecto invernadero por kilómetro de recorrido por el vehículo para los combustibles a diésel y DB-5, mientras que para los buses a gas natural se determinó Tier 2 al ser el único combustible donde el Perú cuenta con un factor de emisión en base al contenido de carbono específico del país. Luego del cálculo independiente, estas emisiones se reportan de forma agregada y se reporta el resultado en Dióxido de carbono equivalente (CO₂ – eq), pues no se realiza una simple suma, sino que se toma en cuenta el potencial de

calentamiento global (*Global Potential Warming* o GWP por sus siglas en inglés) de cada uno de los gases GEI.

El potencial de calentamiento global es un índice que mide el forzamiento radiativo tras una emisión de una unidad de masa de cierta sustancia acumulada durante un periodo de tiempo determinado en comparación con la sustancia de referencia o en otras palabras su capacidad de absorber calor (IPCC, 2014). Dicho esto, respecto a los gases liberados producto del transporte, La **Tabla 1** muestra el potencial de calentamiento global para los GEI contaminantes producto del transporte para un horizonte de 100 años los cuales deben interpretarse de la siguiente manera; 1 kg de óxido nitroso (N₂O) tiene una equivalencia de 310 kg de dióxido de carbono CO₂eq.

Tabla 1: Potencial de Calentamiento Global

Contaminante	GPW
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310

FUENTE: Valores extraídos del Segundo reporte del IPCC (AR2)

2.3. Rendimiento

El rendimiento es una relación entre la distancia recorrida por un vehículo expresada en kilómetros y el volumen de combustible consumido, cuya unidad depende del tipo de combustible que consume el bus. Es una medida tradicional de determinar la eficiencia de una unidad; sin embargo, no permite comparar la eficiencia de un motor Diesel versus un motor que usa GNV o un motor eléctrico.

Ecuación 1: Determinación del Rendimiento de un bus

$$\text{Rendimiento} \left[\frac{\text{km}}{a, b, c} \right] = \frac{\text{Distancia recorrida}[\text{km}]}{\text{Cantidad de combustible } [a, b, c]}$$

Donde:

a = galón (gal) para el combustible diésel y DB-5

b = m³ (metros cúbicos) para el gas natural (GNV)

c = kWh (kilovatio-hora) para los buses eléctricos

El procedimiento para determinar el rendimiento de una unidad de transporte consiste en realizar una lectura del tacómetro (*Medida A en Km*) antes de iniciada la marcha y una lectura del tacómetro al finalizar el recorrido (*Medida B en Km*); Antes de iniciar la marcha el vehículo debe contener la capacidad total del tanque de combustible y al finalizar la marcha

se debe llenar nuevamente el tanque y registrar el volumen de combustible requerido para completar nuevamente su capacidad completa logrando un registro del *Volumen Total*.

Ecuación 2: Ejemplo de determinación del rendimiento

$$Rendimiento \left[\frac{km}{U} \right] = \frac{medición B[km] - medición A[km]}{Volumen total [gal o m^3]}$$

2.4. Rendimiento Energético

El rendimiento energético es una unidad que permite comparar la energía utilizada por cada unidad de distancia desplazada llevando el rendimiento de cada unidad de transporte a unidades energéticas universales; el rendimiento energético por distancia recorrida representa el rendimiento en unidades energéticas expresada en kilómetro recorrido por Giga-Joules (*km/GJ*).

2.4.1. Diesel y Gas Natural Vehicular

Se determina el rendimiento energético de un bus a diésel o gas natural mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 3: Determinación del rendimiento energético de buses a diésel y GNV

$$Rendimiento\ energético \left[\frac{Km}{Gj} \right] = \frac{Rendimiento \left[\frac{km}{a, b} \right]}{Poder\ calorífico\ del\ combustible \left[\frac{GJ}{a, b} \right]}$$

Donde:

- *a*: galón (gal) para el combustible diésel
- *b*: metros cúbicos (m³) para el gas natural (GNV)
- Poder calorífico de la **Tabla 2**.

Tabla 2: Poder Calorífico

Fuente de Energía	Poder Calorífico	Unidad
Gas Natural Vehicular	0.04	GJ/m ³
Diesel	0.13	GJ/gal
Biocombustible	0.09	GJ/gal
DB-5*	0.14	GJ/gal

FUENTE: RAGEI (2016); *Determinado en base al 95% diésel y 5% biocombustible

2.4.2. Combustible DB5

El cálculo del rendimiento energético del combustible DB-5, se pudo calcular determinando un nuevo poder calorífico del DB-5: sumando el poder calorífico del diésel al 95% y el poder calorífico del biocombustible al 5%, como se hizo en la **Tabla 2** Para luego usar la fórmula de la Ecuación 4. Esto para considerar dos escenarios de resultado: (i) escenario 1, cuando el diésel se encuentra al 100% de su pureza, y (ii) escenario 2, se refiere a un escenario real, donde se utilizó como combustible el Diésel B5 (DB-5), mezcla de combustibles en un 5% de biocombustible y 95% diésel.

Sin embargo, para fines del estudio y facilidad del cálculo de los factores de emisión posteriormente, el cálculo se realizó en base a cada componente de la mezcla del combustible.

Ecuación 4: Determinación del rendimiento energético de buses a DB-5

$$A = \frac{\text{Rendimiento del bus}}{P \cdot C_{\text{Diésel}}} \qquad B = \frac{\text{Rendimiento del bus}}{P \cdot C_{\text{Biocombustible}}}$$

$$\text{Rendimiento energético DB} - 5_{\text{Total}} = C = (A \times 95\%) + (B \times 5\%)$$

Donde:

- P. C: Poder calorífico del combustible en GJ/gal.
- A: Rendimiento energético del diésel en km/GJ
- B: Rendimiento energético del biocombustible en km/GJ
- C: Rendimiento energético del DB-5 total en km/GJ
- Rendimiento del bus: en km/gal

2.4.3. Bus Eléctrico

Para el bus eléctrico solo se realizó una conversión de unidades como se observa en la siguiente ecuación:

Ecuación 5: Determinación del rendimiento energético del bus eléctrico

$$\text{Rendimiento energético}_{\text{Eléctrico}} \left[\frac{\text{km}}{\text{GJ}} \right] = \frac{\text{Rendimiento del bus}}{F \cdot C}$$

Donde:

- Rendimiento energético en km/GJ
- F. C: Factor de conversión de unidades es 3.6×10^{-3} GJ/kWh
- Rendimiento del bus en km/kWh

2.5. Cálculo de factores de emisión de GEI

Con los resultados del rendimiento energético es posible determinar un factor de emisión comparativo por kilómetro recorrido que recoge las características específicas de cada combustible utilizado.

2.5.1. Diesel y Gas Natural Vehicular

Para el cálculo de factores de emisión de los gases de efecto invernadero en g/km, se consideró el rendimiento energético (Km/GJ) de cada combustible determinado mediante la Ecuación 3 y los factores de emisión (FE) del IPCC del Tier 1 (ver **Tabla 3**).

Ecuación 6: Determinación del factor de emisión de buses a diésel y GNV

$$F. E_{i,j,k} \left[\frac{g_{GEI_{i,j,k}}}{km} \right] = \frac{F. E_{i,j,k} \left[\frac{g_{GEI_{i,j,k}}}{GJ} \right]}{\text{Rendimiento energético} \left[\frac{km}{GJ} \right]}$$

Donde:

- $F. E_{i,j,k}$: Factor de emisión calculado por tipo de GEI (g/km);
- $F. E_{i,j,k}$: Factor de emisión del Tier 1 por tipo de GEI (g/GJ);
- Rendimiento energético de los buses diésel, gas natural y eléctrico en (km/GJ);
- i, j, k : CO₂, CH₄, N₂O; respectivamente.

Tabla 3: Factor de emisión (kg/GJ) Tier 1 del IPCC 2006

Combustible	gCO ₂ /GJ	gCH ₄ /GJ	gN ₂ O/GJ
GNV	56126.26	92.00	3.00
Diesel	74100.00	3.90	3.90
Biocombustible	0.00	3.00	0.60

FUENTE: RAGEI (2016)

2.5.2. Combustible DB-5

Para el contenido de biodiesel al 5%, el cual, al ser un combustible renovable, se consideró neutralidad en sus emisiones de CO₂ y factor de emisión para dióxido de carbono igual a 0, como se indica en la Tabla 3. Para el caso del CH₄ y N₂O se toma como referencia los factores de emisión del biocombustible. Mientras que el 95% de su composición restante es diésel en el que se consideran las emisiones de todos los GEI para este combustible.

Luego de determinar el rendimiento energético en la Ecuación 4: Determinación del rendimiento energético de buses a DB-5, se calcula los factores de emisión de la siguiente forma:

Ecuación 7: Determinación del factor de emisión de buses a DB-5

$$F.E_{i,j,k} \left[\frac{g_{GEI_{i,j,k}}}{km} \right] = \frac{95\% \times F.E(A)_{i,j,k}}{A} + \frac{5\% \times F.E(B)_{i,j,k}}{B}$$

Donde:

- $F.E_{i,j,k}$: Factor de emisión calculado por tipo de GEI en g/km;
- $F.E(A)$: Factor de emisión por tipo de GEI del diésel Tier 1 en g/GJ;
- $F.E(B)$: Factor de emisión por tipo de GEI del biocombustible Tier 1 en g/GJ;
- A : Rendimiento energético del diésel en km/GJ;
- B : Rendimiento energético del biocombustible (ver) en km/GJ;
- i, j, k : CO₂, CH₄, N₂O; respectivamente.

2.5.3. Bús Eléctrico

Se consideró el factor de emisión del sistema eléctrico interconectado nacional (SIEN) para el año 2019, por ser el dato más reciente que se tiene a nivel país (ver **Tabla 4**). Además, se consideró el factor de pérdida por transmisión y distribución que se muestra en la **Tabla 5**.

Ecuación 8 Determinación del factor de emisión del bus eléctrico

$$F.E_{CO_2} \left[\frac{g_{CO_2}}{km} \right] = \frac{F.E_{CO_2} \left[\frac{g_{CO_2}}{GJ} \right]}{(1 - F_{T,D}) \times \text{Rendimiento energético} \left[\frac{km}{GJ} \right]}$$

Donde:

- $F.E_{CO_2}$: Factor de emisión calculado por tipo de GEI [g/km];
- $F.E_{CO_2}$: Factor de emisión del Tier 1 por tipo de GEI [g/GJ];
- Rendimiento energético de los buses diésel, gas natural y eléctrico [km/GJ];
- $F_{T,D}$: Factor de pérdida por transmisión y distribución [%]

Tabla 4: Factor de emisión del sistema eléctrico interconectado nacional (SIEN) - 2019

Año	Factor de emisión del SIEN (gCO ₂ /GJ)
2017	51222.22
2018	41972.22
2019	43250.00

FUENTE: MINEM (2020)

Tabla 5: Pérdida por transmisión y distribución - 2018

Factor	Valor	Unidad
Sistema eléctrico	11.03	%

FUENTE: MINEM (2020)

El cálculo de los factores de emisión de CO₂ equivalente se determinó mediante una sumatoria ponderada de acuerdo al potencial de calentamiento global de cada gas de efecto invernadero, como se muestra en la ecuación siguiente:

Ecuación 9 Determinación del factor de emisión de CO₂ equivalente

$$F.E \left[\frac{gCO_2eq}{km} \right] = \sum F.E_{i,j,k} \times Potencial\ de\ calentamiento_{i,j,k}$$

Donde:

- *F.E*: Factor de emisión CO₂ equivalente calculado en gCO₂eq/km;
- *FE_{i,j,k}*: Factor de emisión por tipo de GEI calculado en g/km;
- Potencial de calentamiento global: por tipo de GEI
- *i, j, k*: CO₂, CH₄, N₂O; respectivamente.

2.6. Variables que afectan el calculo de los factores de emisión

El cálculo de los factores de emisión depende del rendimiento energético (Gj/Km) calculado que a su vez depende del rendimiento de cada unidad (Km/Unidad de volumen de combustible utilizado) siendo una medida de los kilómetros recorridos gracias a una determinada cantidad de combustible utilizado. Esta cantidad de combustible utilizado puede verse afectado por algunas variables que se listan a continuación en la tabla siguiente:

Tabla 6: Variables que afectan el consumo de Combustible

Variable	Efecto sobre el consumo de combustible
Peso del Vehículo	El consumo del combustible aumenta a medida que incrementa el peso de la carga transportada para buses que utilizan GNV, este comportamiento es menos perceptible para los buses a Diésel B5.
Número de Mediciones	El número de mediciones debe ser el mínimo necesario para comparar y promediar resultados; no contar con las mediciones necesarias impide aproximar el consumo promedio de la ruta recorrida
Pasajeros	Los pasajeros influyen sobre el peso del vehículo; es una variable complicada de determinar durante el recorrido de la unidad por la alta variabilidad de pasajeros en la ruta
Horario de Operación	Es sabido que la congestión vehicular extendiendo el tiempo en funcionamiento de los motores; horarios prolongados de congestión llevan mayores tiempos de aceleración y freno; por lo tanto el horario de operación determina el aumento o disminución de consumo
Día de Operación	Los días de operación influyen sobre el número de pasajeros transportados; recorrer el vehículo un día de semana de lunes a viernes puede ser muy diferente a recorrerlo durante los fines de semana (sábado – Domingo)
Ruta y Ciclo de Marcha	La ruta recorrida por la unidad es decir las avenidas y calles por las que circular determinan un ciclo de marcha particular afecto a frenadas por semáforos y obstáculos que aumentan o disminuyen los tiempos de aceleración
Modelo de Bus	El modelo de bus tiene características particulares funcionales de la influencia de cada uno de sus componentes y la articulación de cada uno de ellos; determinar la influencia particular individual de los mismos incrementa la incertidumbre por lo que es recomendable utilizar vehículos con el mismo año de fabricación, modelo y sin modificaciones.

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

3.1. Contexto Laboral

Deuman es una firma consultora de matriz chilena con operaciones en el Perú donde se realizan estudios en cambio climático, energía y sostenibilidad hace mas de 27 años. En ese sentido, el autor ha formado parte de esta organización desde el 2019 hasta la fecha como asistente de proyectos y luego como jefe de desarrollo de negocio.

3.1.1. Responsabilidades

Desde el ingreso del profesional a la fecha se han realizado y siguen realizando las siguientes actividades y responsabilidades:

- Estructuración de postulaciones de proyectos y/o estudios de energía, sostenibilidad y cambio climático en procesos de licitación o convocatorias privadas para el desarrollo de los mismos.
- Diseño y estructuración de proyectos de innovación, desarrollo e implementación para fondeo de recursos públicos y privados
- Desarrollo de estudios de diagnóstico y planificación estratégica en empresas privadas de la región latinoamericana
- Desarrollo de estudios para justificar técnicamente instrumentos de política, normas y regulaciones, hojas de ruta, planes y/o estrategias entre otros instrumentos de planificación y política nacional
- Desarrollo de presentaciones de alto impacto, exposiciones en eventos públicos y privados además de otros espacios y programas de formación y fortalecimiento de capacidades.
- Evaluación y desarrollo de mercado para la identificación de la oferta y demanda de nuevos proyectos y estudios en la región latinoamericana

3.1.2. Contribución profesional

Se describe a continuación la contribución profesional del autor específicamente en las labores de desarrollo de estudios para justificar técnicamente instrumentos de política, normas y regulaciones, hojas de ruta, planes y/o estrategias entre otros instrumentos de planificación y política nacional. Durante el desarrollo de esta actividad se suelen encontrar los siguientes desafíos o situaciones problema:

- Los diferentes instrumentos de política y planificación nacional requieren argumentos técnicos sólidos para iniciar, desarrollar, limitar, o condicionar nuevas normas, regulaciones y/o recomendaciones a la sociedad civil o sectores empresariales
- Los argumentos técnicos pueden sostener o limitar instrumentos de planificación que representan inversiones provadas, nacionales y con ello cobeneficios en terminos de empleo, desarrollo económico y desarrollo social.
- Los argumentos técnicos requieren ser sólidos, evitar los sesgos o errores y/o sostener un margen de error menor que permita justificar decisiones de impacto

En ese contexto, el desarrollo de capacidades técnicas y el enfoque de argumentación lógica en la formación profesional del autor, así como habilidades técnicas vinculantes entre las emisiones de gases de efecto invernadero, contaminación atmosférica, física, funcionamiento de motores y en general los impactos del sector transporte permitieron combinar estos aspectos para plantear una estructura evaluativa que permita analizar el impacto de los combustibles en el transporte público de Lima. De esta manera, durante la ejecución de la labor profesional que se está evaluando, el autor contribuyó en el diseño y estructuración de una metodología que permitió capturar datos de campo para demostrar la hipótesis que las emisiones de GEI producto de la combustión de motores de GNV era mayor a las emisiones de los motores Diesel.

En ese sentido, estudios previos confidenciales encargados por entidades de estado y el sector privado difieren en sus resultados teóricos a partir de bibliografía consultada o nominal evitando el uso de datos reales de cuantificación de emisiones por los altos costos (superando los cientos de miles dólares) de monitoreo, logística, supervisión entre otros elementos que limitan el desarrollo de estudios definitivos y/o representativos.

La contribución laboral del autor fue la contribución a un diseño metodológico de evaluación de emisiones de menor costo y menor desafío logístico logrando ser lo mínimamente

representativo; a pesar que esta nueva metodología de evaluación tiene un costo menor (decenas de miles de dolares) aun representa un valor importante para aumentar las muestras o datos capturados significando un desafío para que la metodología logre capturar la representación necesaria que permita evitar errores, sesgos o malos datos además del desafío logístico para evitar los sesgos en la captura de datos y la influencia de elementos externos e incontrolables como el ciclo de marcha o las condiciones de tráfico en la ciudad que influyen negativamente en la toma de datos.

Fueron entonces las capacidades técnicas adquiridas las que permitieron identificar las variables que podían afectar el consumo de combustible, las habilidades técnica y blandas adquiridas durante la permanencia del autor en la empresa desarrollando estudios similares las que permitieron diseñar y lograr los arreglos necesarios para que la empresa de transporte comprometa su apoyo y disposición de alquilar 31 buses de 3 rutas diferentes y somerlas a evaluaciones mecánicas y condiciones operativas que despejen cualquier clase de riesgos que despejen los sesgos en la evaluación de los consumos de combustible.

DEUMAN y su equipo consultor logró así realizar un estudio mas económico, con resultados más sólidos a través de datos no teóricos sino de campo bajo condiciones operativas reales usando el rendimiento energético como el enfoque de aproximación de las emisiones en lugar de usar un enfoque de mediciones con equipos en los tubos de escape de los gases de combustión de los buses. Logrando así calcular los factores de emisión del diesel y GNV comparando entre ellos los resultados utilizando las mismas unidades de medida como lo es el rendimiento.

Esto permite entregar evidencia sólida y el argumento técnico necesario para justificar las políticas de electrificación del transporte público como matriz energética principal en lugar del diesel y el GNV.

3.2. Ambito de Evaluación

A continuación, se describen las rutas por donde circulan las unidades que consumen Diesel B5, Gas Natural y electricidad.

3.2.1. Ruta 107-Corredor Amarillo

Asignada al Corredor Complementario Panamericana (Consorcio Perú BUS S.A.) cuyas características (ficha técnica) de ruta se encuentran en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Ficha técnica de la Ruta 107

Parámetros técnicos	Descripción
Ruta	Servicio 107 (Bajo el régimen de Concesión) Ruta Extraordinario 03
Tipología	ÓMNIBUS (12 metros) y Buses Articulados (18 metros)
Distrito inicio	San Martín de Porras
Distrito fin	San Juan de Miraflores
Flota operativa	74 buses de 12 metros y 3 buses de 18 metros (77 en total)
Tecnología vehicular	77 buses 24 buses a diésel 53 buses a GNV
Año de fabricación	77 buses 24 buses del 2017 y 53 bus del 2018 (no específicos o coincidentes a la tecnología vehicular)
Paradero inicial	Ovalo. Canta Callao (Av. Canta Callao con Av. Naranjal)
Paradero final	Puente Alipio Ponce
Estacionamiento	Av. Canta Callao, Lima 15113
Termino de media vuelta	No cuenta
Longitud Ida	34.5 km
Longitud Vuelta	34.0 km
Itinerario	IDA: Av. Canta Callao / Av. Naranjal / Av. Universitaria / Av. José Granda / Ov. Habich / Av. Alfredo Mendiola (Panamericana Norte) / Av. Zarumilla / Vía Evitamiento / Panamericana Sur / Puente Alipio Ponce / Av. Alipio Ponce
	VUELTA: Puente Alipio Ponce / Panamericana Sur / Vía Evitamiento / Av. Zarumilla (Panamericana Norte) / Av. Alfredo Mendiola (Panamericana Norte) / Ov. Habich / Av. José Granda / Av. Universitaria / Av. Naranjal
Coordenadas Patio	11°57'50.8"S 77°05'02.6"W
Coordenadas Grifo de carga	11°56'50.3"S 77°04'17.5"W
	11 min (4.3 km)

FUENTE: Elaboración en base a PROTRANSPORTE

Se puede observar de la ficha que la ruta 107 tiene un recorrido aproximado de 68.5 km medidos entre su paradero final e inicial; así mismo cuenta con una flota de 77 buses que transporta una demanda en día hábil de aproximadamente 30,000 pasajeros.

Es importante notar también que existen kilómetros de recorrido adicionales a los 68.5 km de ruta dado que los buses tienen recorridos desde su patio hasta el primer paradero y viceversa; y en otros casos recorridos desde su patio de maniobras al grifo y posteriormente al primer paradero. Estos tramos para el entendimiento del lector se reflejan en la **Figura 1** y se detallan las distancias a continuación:

- Distancia entre el patio y el primer paradero:
- Distancia entre el Patio y el grifo:
- Distancia entre grifo y el primer paradero:
- Distancia entre el paradero final y su retorno a la vía de regreso (media vuelta):

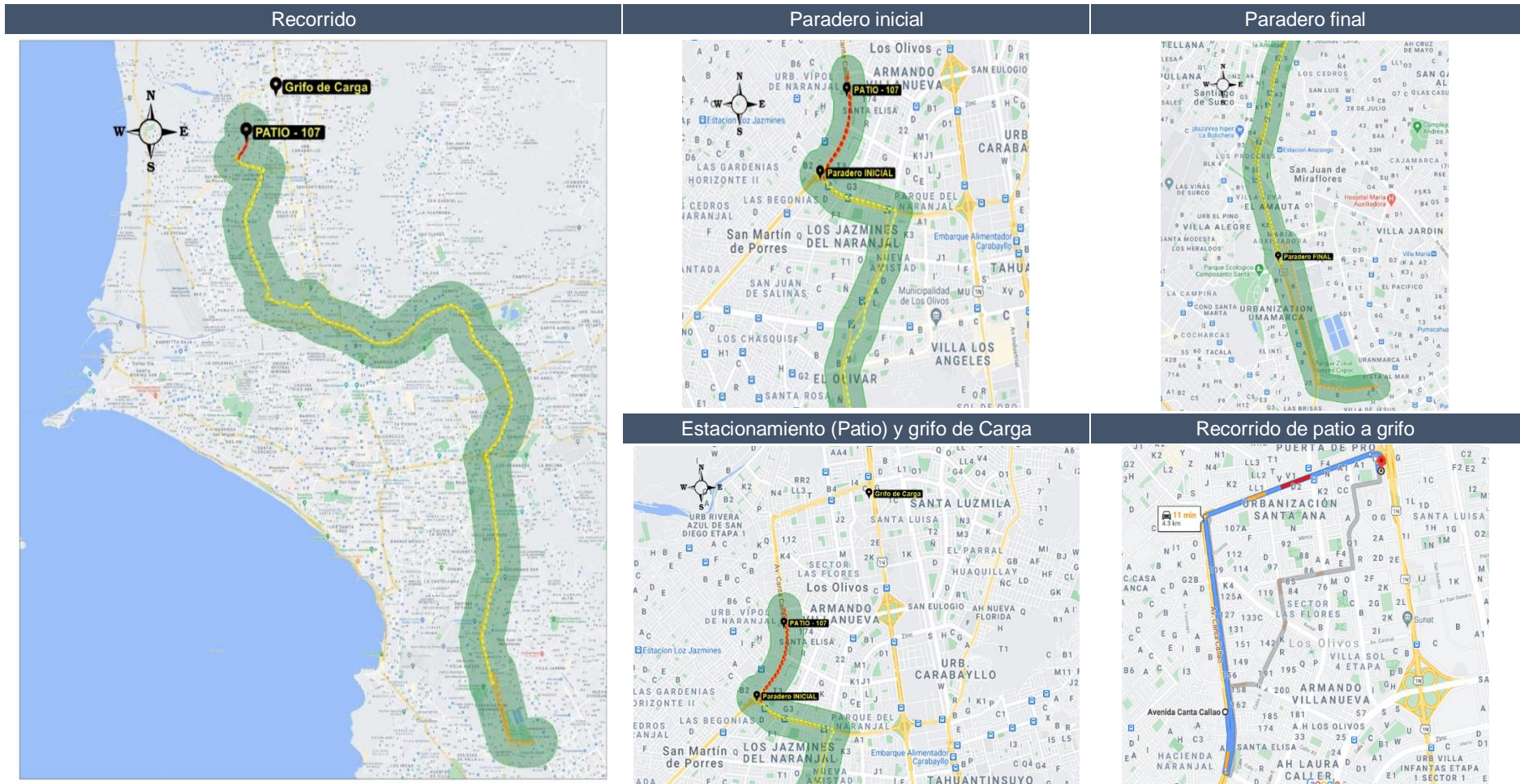


Figura 1: Ubicación de la Ruta 107

3.2.2. Ruta 201-Corredor Rojo

Asignada al Corredor Complementario Javier Prado (Consortio Allin Group S.A.). El servicio 201 es uno de los 6 servicios de transporte público dentro del corredor Javier Prado el cual operan bajo el régimen de concesión los otros servicios son: servicio 202, servicio 206, servicio, servicio 209 y el servicio 257. Las especificaciones de la ruta 201 se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8: Ficha técnica de la Ruta 201

Parámetros técnicos	Descripción
Ruta	Servicio 107 (Bajo el régimen de Concesión) Ruta Extraordinario 03
Tipología	ÓMNIBUS y Buses Articulados
Distrito inicio	ATE
Distrito fin	San Miguel
Flota operativa	98 buses de 12 metros de un total de 257 buses en el corredor Javier Prado
Tecnología vehicular	98 buses 41 buses a Diesel 57 buses a GNV 15 buses del 2007 al 2010 8 buses del 2011
Año de fabricación	98 buses 13 buses del 2012 1 bus 2016 24 buses del 2017 37 buses del 2018
Paradero inicial	Av. Javier Prado con la Av. Nicolas Arriola
Paradero final	Av. La Marina con la Av. Universitaria
Estacionamiento	Florida 1 Mz 1 Lte1 Fundo Barbadillo – Ate
Termino de media vuelta	No cuenta
Longitud Ida	23.5 km
Longitud Vuelta	23.5 km
Itinerario	IDA: Av. Canta Callao / Av. Naranjal / Av. Universitaria / Av. José Granda / Ov. Habich / Av. Alfredo Mendiola (Panamericana Norte) / Av. Zarumilla / Vía Evitamiento / Panamericana Sur / Puente Alipio Ponce / Av. Alipio Ponce VUELTA: Puente Alipio Ponce / Panamericana Sur / Vía Evitamiento / Av. Zarumilla (Panamericana Norte) / Av. Alfredo Mendiola (Panamericana Norte) / Ov. Habich / Av. José Granda / Av. Universitaria / Av. Naranjal
Coordenadas Patio	12°02'17.8"S 76°55'07.9"W
Coordenadas Grifo de carga	12°02'15.3"S 76°55'51.5"W 11 min (3.1 km)

FUENTE: Elaboración propia en base a PROTRANSPORTE.

Se puede observar de la ficha que la ruta 201 tiene un recorrido aproximado de 47 km medidos entre su paradero final e inicial; así mismo cuenta con una flota de 98 buses que transportan una demanda en día hábil de aproximadamente 65,000 pasajeros. Es importante notar también que existen kilómetros recorridos adicionales a los 47 km de ruta dado que los buses tienen recorridos adicionales. Esta ruta cuenta con la operación de un bus eléctrico que no se guarda en el patio habitual de maniobras de la ruta 201 sino por el contrario se guarda en el patio de la ruta 107 donde tiene un espacio específico para su estacionamiento al lado de su punto de recarga.



Figura 2. Estación de carga del bus eléctrico

Así mismo, los buses diésel de esta ruta se abastecen en un grifo o máquina de abastecimiento que se encuentra al interior del patio de maniobras. Estos tramos adicionales para el entendimiento del lector se reflejan en la Figura 3 y se detallan las distancias a continuación:

- Distancia entre el patio y el primer paradero:
- Distancia entre el Patio y el grifo:
- Distancia entre grifo y el primer paradero:
- Distancia entre el paradero final y su retorno a la vía de regreso (media vuelta)

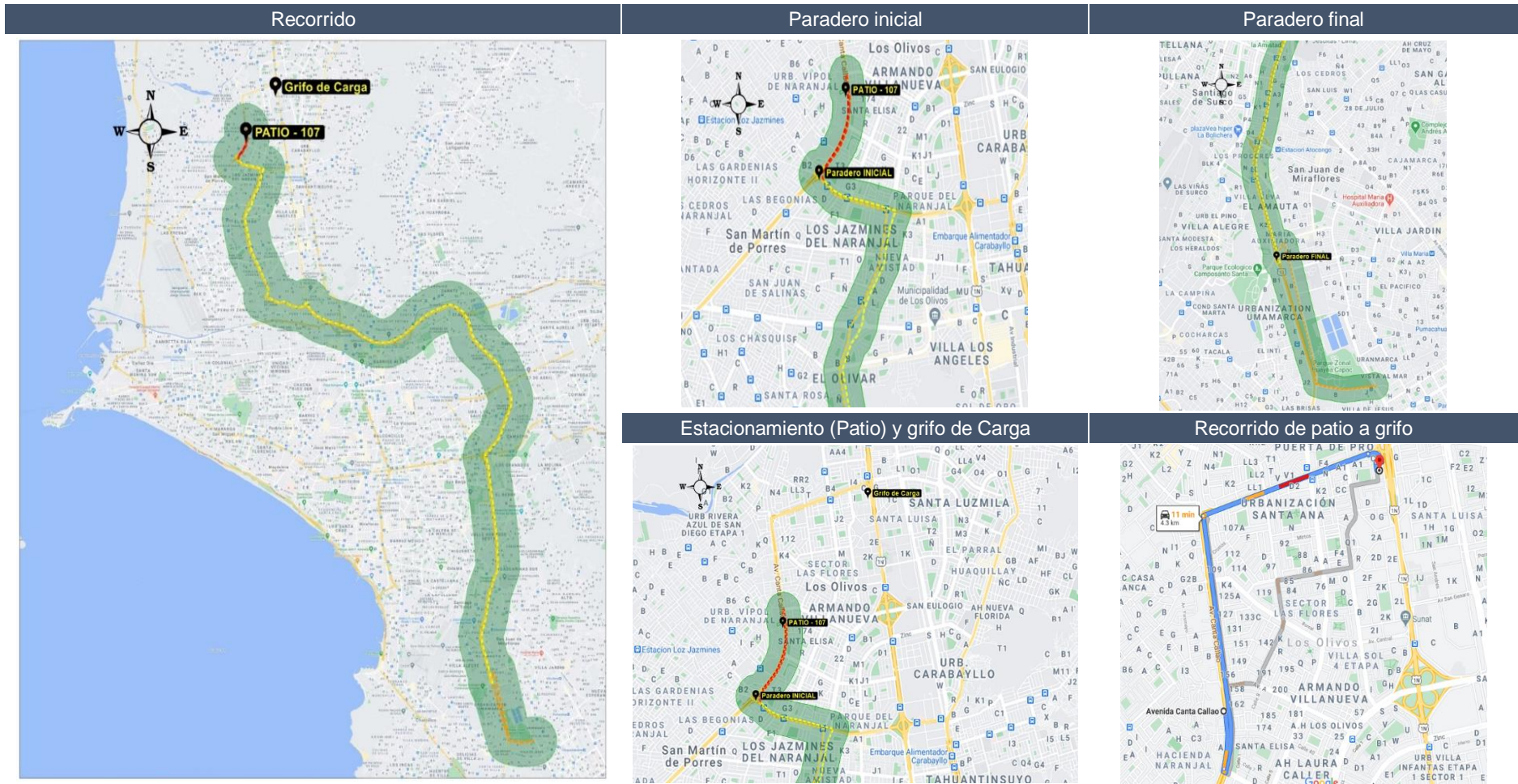


Figura 3. Ubicación de la Ruta 201

3.2.3. Ruta 4515

Servicio de transporte regular asignada a la empresa de transporte E.T. Servicios Santa Rosa de Lima S.A. Las especificaciones de la ruta se encuentran en la **Tabla 9**.

Tabla 9: Ficha técnica de la Ruta 4515

Parámetros técnicos		Descripción
Ruta		4515 (Bajo el régimen de autorización)
Tipología		ÓMNIBUS
Distrito inicio		ATE
Distrito fin		Pueblo Libre
Flota requerida		80
Flota operativa		76 (mas 4 unidades de flota reten)
Flota habilitada		73
Tecnología vehicular	73 buses	26 buses a Diesel 47 buses a GNV 2 buses del 2008 42 buses del 2010 1 bus del 2011
Año de fabricación	98 buses	3 buses del 2013 9 buses del 2014 1 bus del 2016 15 buses del 2017
Paradero inicial		Av. José Carlos Mariátegui (Alt Huaycán Zona Q)
Paradero final		No cuenta
Estacionamiento		Avenida Pedro Ruiz Gallo S/N
Termino de media vuelta		Av. Simón Bolívar / Ca José Antonio encimas
Longitud IDA		36.24 km
Longitud Vuelta		37.54 km
Itinerario		<p>IDA: Av. José Carlos Mariátegui (Alt. Zona "Q") / Av. 15 de Julio / Nicolas De Piérola / Av. Las Torres / Av. Ramiro Priale / Vía de Evitamiento / Interc. Vial Este / Vía de Evitamiento // Pte. Ricardo Palma/Av. Abancay/Av. Manco Capac / Av. 28 de Julio / Pza. Jorge Chávez / Av. Gral. Felipe Salaverry / Av. Cuba / Av. República Dominicana / Jr. Huamanchuco / Av. Alfranio de Mello Franco / Ca. Coraceros / Jr. Juan Pablo Fernandini / Av. Simón Bolívar /</p> <p>VUELTA: Ca. José Antonio Encinas / Av. Mariano Cornejo / Jr. Húsares de Junín / Av. Gral. Garzón / Av. José María Plaza / Jr. Huiracocha / Av. Cuba / Av. Gral. Felipe Salaverry / Pza. Jorge Chávez / Av. Manco Cápac / Av. Abancay / Pte. Ricardo Palma/Av. 9 de octubre / Pte. Huánuco / Vía de Evitamiento / Interc. Vía Este / Vía de Evitamiento / Av. Ramiro Priale / Av. Las torres / Carretera Central / Av. Andrés Avelino Cáceres / Av. 15 de Julio / Av. José Carlos Mariátegui (Alt. Zona "Q")</p>
Coordenadas Patio		12°00'36.1"S 76°50'09.6"W
Coordenadas Grifo de carga		12°00'24.2"S 76°50'55.8"W 6 min (1.6 km)

FUENTE: Elaboración en base a PROTRANSPORTE.

Se puede observar de la ficha que la ruta 4515 que tiene un recorrido aproximado de 74 km medidos entre su paradero final e inicial; así mismo cuenta con una flota de 73 buses. Esta es una ruta de comportamiento diferente a las rutas anteriores, su tiempo de duración es mucho mayor debido a las condiciones de tráfico que causan demoras en el tiempo total de recorrido. Al igual que las rutas anteriores, esta presenta tramos adicionales que serán tomados en cuenta como se muestra en Figura 4

- Distancia entre el patio y el primer paradero:
- Distancia entre el Patio y el grifo:
- Distancia entre grifo y el primer paradero:
- Distancia entre el paradero final y su retorno a la vía de regreso (media vuelta)



Figura 4. Ubicación de la Ruta 4515

3.3. Abordaje de variables que afectan el consumo de combustible

El buen manejo y abordaje de las variables descritas en la sección 3.6 determinar el diseño de la fase de campo para la toma de datos y lecturas de tacómetro así como el consumo de combustible asociado. La metodología de evaluación consiste en el análisis de una serie de variables descritas a continuación:

- a) **Peso neto del vehículo:** Para los buses de la Ruta 201 y 107, se consideró los pesos de fábrica del vehículo indicado en las tarjetas de propiedad, debido a que no se realizaron modificaciones a sus unidades. Para la ruta 4515, debido a las modificaciones físicas externas en los buses (sin modificaciones en los motores), estos fueron pesados para caracterizar el peso de la flota a evaluar. La Tabla 10 presenta los pesos de los buses por ruta y se evidencia que a diferencia de las rutas 201 y 107, esta ruta tiene vehículos GNV más pesados que los Diesel de la misma ruta debido a los tanques de GNV adicionados a los vehículos. Esta diferencia es de aproximadamente entre 500 y 1000 kg lo cual representa en promedio entre 6 y 14 pasajeros considerando un peso promedio de 75kg por persona.

Tabla 10: Pesos netos (kilogramos) de los buses

Combustible	Ruta 201			Ruta 107			Ruta 4515		
	N° de bus	Placa	Peso neto (kg)	N° de bus	Placa	Peso neto (kg)	N° de bus	Placa	Peso neto (kg)
Eléctrico	Bus 1	BCM835	13920	-	-	-	-	-	-
	Bus 2	AXD723	9600	Bus 12	AXV819	9600	Bus 22	B3D758	11380
	Bus 3	AXD864	9600	Bus 13	AXW902	9600	Bus 23	A0H759	11760
Diésel	Bus 4	AXD850	9600	Bus 14	AXY736	9600	Bus 24	B3O741	11490
	Bus 5	AXD872	9600	Bus 15	AXY911	9600	Bus 25	C3G703	10180
	Bus 6	AXD919	9600	Bus 16	AXZ789	9600	Bus 26	D3I701	11640
	Bus 7	AWI780	10160	Bus 17	AWE760	10160	Bus 27	B3P750	12650
GNV	Bus 8	AWH728	10160	Bus 18	AWE762	10160	Bus 28	B4S747	12700
	Bus 9	AWI779	10160	Bus 19	AWE772	10160	Bus 29	C3M708	11060
	Bus 10	AWY802	10160	Bus 20	AWE773	10160	Bus 30	B3P790	12740
	Bus 11	AXC939	10160	Bus 21	AWE778	10160	Bus 31	B8A711	10320

- b) **Días de Medición:** Se realizará las mediciones de campo de lunes a viernes sin considerar los días atípicos como lo son los feriados, sábado y domingos donde el flujo de vehículos y pasajeros en la ciudad puede variar significativamente
- c) **Horario de Medición:** para la Ruta 201 se realiza dos horarios de medición que reflejan condiciones de hora pico de 6:30 a 8:00 am y de 17:00 a 18:30; adicionando una medición adicional para cada bus en horario valle entre las 9:00 a 11 am. En la Ruta 107 se mide dos horarios de 5:30 a 7:00 am y de 17:00 a 18:30 adicionando una medición para cada bus en horario valle entre las 9:00 a 11 am.

En la Ruta 4515 se mide dos horarios también para caracterizar la hora Pico de 6:30 a 7:30 am y de 17:00 a 18:30. Se decide no medir en Valle debido a las limitaciones operativas, la longitud de la ruta y disponibilidad de unidades

- d) **Ruta de recorrido y ciclo de marcha:** Cómo se explicó en la sección anterior, el recorrido está definido por las rutas, 107, 201 y 4515; sin embargo, durante el recorrido los buses pueden estar sujetos a ciclos de marcha distintos. Para poder comparar entre las unidades de Diesel DB5, Gas natural y la unidad eléctrica se consideró una frecuencia mínima de salida entre los buses GNV y diésel con el fin que sean afectados por el mismo ciclo de marcha causado por la congestión vehicular de dicha ruta. Esto significa que los buses inician su recorrido uno seguido de otro. Además, con ello se busca reducir la incertidumbre de otros factores como accidentes en la vía, cantidad de vehículos en la ruta, cantidad de pasajeros, entre otros; los cuales no pueden ser controlados por su naturaleza.
- e) **Modelo de buses y año de fabricación:** se evidenció mediante las tarjetas de propiedad que los vehículos de las rutas 201 y 107 tienen las mismas unidades en términos de marcas, modelos y los años de fabricación, sin embargo, en la ruta 4515 las marcas, y modelos son distintos en las unidades a gas natural (GNV) pero los años de fabricación son los mismos. Los modelos son:

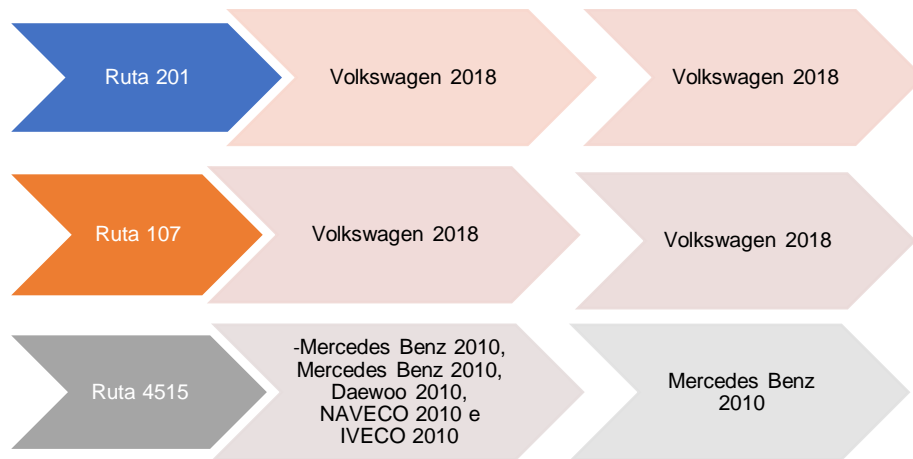


Figura 5. Modelos de buses y año de fabricación de los buses diésel (izquierda) y GNV (derecha)

- f) **Número de mediciones:** Cada medición implica un alto costo asociado de tiempo y recurso humano por lo que se propone realizar un mínimo de 7 mediciones en cada bus que permita comparar y promediar resultados definiendo este número en función al presupuesto y disponibilidad de las unidades para la fase de campo o mediciones. Estas mediciones se distribuyeron de la siguiente forma: se programará 1 medición en blanco en hora pico mañana, 2 en hora pico mañana, 2 en hora pico tarde y 2 en hora valle sumando un total de 7 mediciones para cada bus. Cada par de mediciones se realizará en el mismo día en semanas diferentes. Cada medición se realizará en “vuelta completa” es decir en recorrido ida y vuelta: Norte-Sur-Norte o Este-Oeste-Este.

3.4. Procedimiento de toma de muestra

El procedimiento de toma de muestra se realiza para cada medición por cada uno de los buses. Los resultados se llenan manualmente en fichas técnicas de observación y posteriormente se sistematizan en la plataforma de almacenamiento en la red por Google Drive. La Figura 6 muestra la ficha utilizada para el levantamiento en campo. A continuación, se detalla el procedimiento de toma de muestra:

El bus deberá estar con la capacidad de su tanque completamente lleno o hasta donde su capacidad lo permita. Para esto se debe detener el llenado en el momento que el disparador automático de la pistola de combustible detiene el flujo; adicionalmente todos los buses DB-5 y GNV deben ser llenado en la misma estación de servicio y abastecidos en la misma isla de combustible dentro de la estación de servicio para cada uno de los 5 buses GNV y DB-5 según ruta.

Una vez lleno se deberá anotar el kilometraje que se visualiza en su tablero o tacómetro. Se deberá anotar la hora en que se registra esto además de una foto que evidencie el valor anotado, la fotografía debería permitir visualizar la fecha y hora (Medición A).

Se debe hacer trabajar el bus normalmente, haciéndole recorrer su ruta en el sentido que le corresponde. Las rutas 4515 y 201 recorren el sentido E-O-E es decir de “vuelta completa” y la ruta 107 recorre el sentido N-S-N también de “vuelta completa”. Cada Vuelta completa será considerada 1 medición. Las distancias se registran por tacómetro, así como por gps.

Se deberá llenar nuevamente el tanque y anotar el volumen de combustible que se requirió para su llenado. Se anota el volumen cargado y su respectivo medio de verificación, se deberá adjuntar la boleta de dicha carga en la que figure el monto gastado (Volumen total).

__/__/2020

FICHA DE DATOS

Medición __/__/__



Datos Generales			
Bus		Fecha	
Placa		Combustible	
Padrón		Chofer	
Ruta		Peso del Vehículo	
Modelo		Largo de Vehículo	

Datos de Partida			
Hora de salida		Grifo	
Tacómetro en Patio		Isia	
Km Patio-Grifo (gps)		Pistola	
Tacómetro en Grifo		Duración del abastecimiento	
Hora de llegada al Grifo		Volumen de combustible	
Tacómetro en Par. Ini.		costo del energético	
Km Grifo-Par.ini.		Monto equivalente	
Hora de llegada Par.Ini.		Manometro bus	
Observaciones:			

Datos de Media Vuelta			
Hora de termino		Tiempo de espera	
Tacómetro de Par.Fin		Pasajeros en media vuelta	
Tacómetro de Par.Ini		Km totales ida	
Observaciones:			

Datos de Llegada			
Hora de termino		Grifo	
Tacómetro en Par.Fin		Isia	
Km Par.Fin-Grifo (gps)		Pistola	
Tacómetro en Grifo		Duración del abastecimiento	
Hora de llegada al Grifo		Volumen de combustible	
Tacómetro en Patio		costo del energético	
Km Grifo-Patio.		Monto equivalente	
Hora de llegada Patio.		Manómetro bus	
Km totales regreso			
Observaciones:			

Datos de Recorrido							
Pasajeros totales ida				Pasajeros totales vuelta			
Nro Paraderos ida				Nro Paraderos Vuelta			
Paradero	Nº de pasajeros	Hora de lleg.	Km	Paradero	Nº de pasajeros	Hora de lleg.	Km
P1				P1			
P2				P2			
P3				P3			
P4				P4			
P5				P5			
P6				P6			
P7				P7			
P8				P8			
P9				P9			
P10				P10			
P11				P11			
P12				P12			
P13				P13			
P14				P14			
P15				P15			

Figura 6. Ficha Técnica

3.5. Campaña de Mediciones

La siguiente campaña consiste en el monitoreo de ciertas variables (descritas en la sección 4.2) en buses a combustión a diésel y GNV, de tres rutas que recorren en Lima Metropolitana y Callao (LMC); el objetivo de la campaña de mediciones es lograr obtener datos de consumo de combustible y distancia recorrida principalmente que después permitan obtener los rendimientos energéticos promedios y por consecuencia los factores de emisión.

La campaña tiene una semana inicial de mediciones en blanco o denominadas así porque las unidades recorren sin pasajeros simulando el ciclo de marcha habitual en el horario pico más congestionado (Horario de mañana); se cuenta además con dos semanas de mediciones principales con pasajeros en horario pico y horario valle. Dado que las mediciones están sujetas a interrupciones operativas, bloqueos en calle, fallas mecánicas, errores de registro entre otras variables, algunas de estas mediciones se repiten en un periodo de reprogramaciones que coincida con las características medidas inicialmente como hora y día.

Cabe resaltar que el número de buses y el número de mediciones responde a limitaciones presupuestarias, operativas y logísticas; cada medición requiere cubrir los costos de una persona para que acompañe el bus durante todo el recorrido de la ruta y garantice las evidencias necesarias para los datos, así mismo las mediciones en blanco requieren alquilar las unidades y costear su recaudación promedio además del costo del combustible utilizado. Adicionalmente se tuvo que costear las revisiones técnicas mecánicas para garantizar que las unidades no tienen diferencias mayores en sus componentes. Hacer recorrer buses específicos en momentos determinados del día altera la programación operativa y distribución de la ruta lo que puede estar sujeto a decisiones de los dueños de las unidades, los administradores o los controladores de ruta. El trabajo busca en mayor medida costear la mínima cantidad de mediciones para tener datos promediables y comparables en un primer intento de mejorar los resultados en torno a factores de emisión con mayor grado de precisión. Finalmente, la limitación de contar con un solo bus eléctrico en el sistema de transporte público nacional, limita en mayor medida el uso del mismo; sin embargo, en la sección iv se explica y evidencia que la necesidad de mayor cantidad de mediciones en buses eléctricos no resulta significativa o determinante

En la Figura 7 se detalla el cronograma de las campañas respectivas.

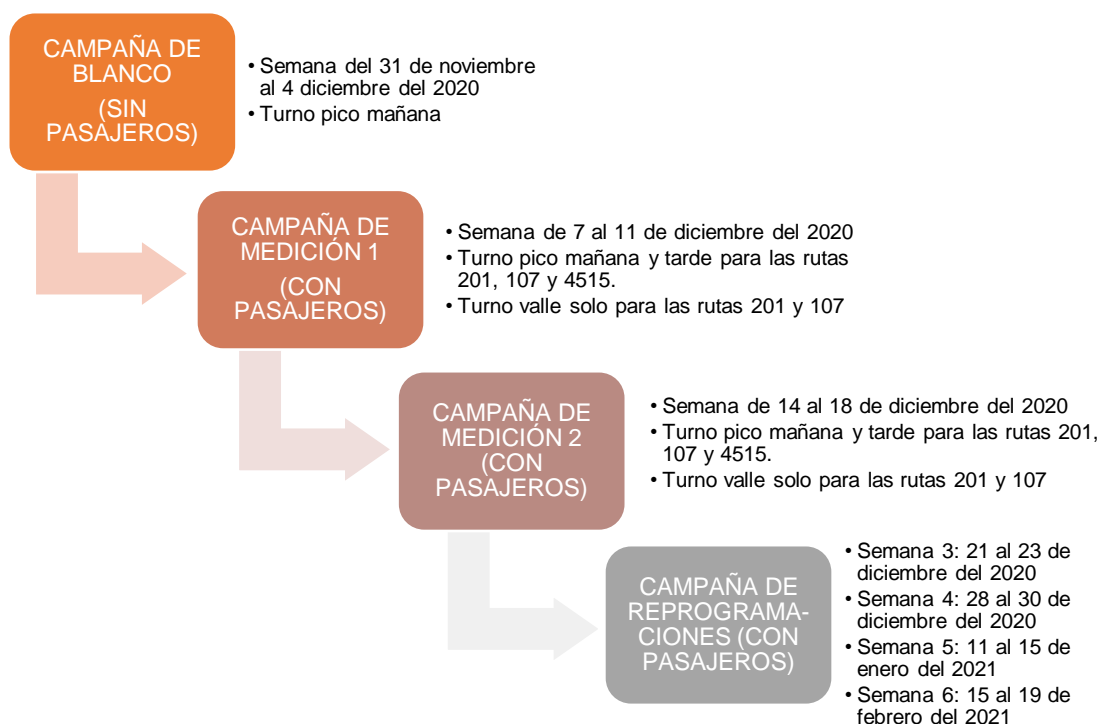


Figura 7. Campañas de mediciones

3.5.1. Campaña en Blanco

De acuerdo al diseño de campaña de mediciones y con la finalidad de evaluar la influencia de la variable pasajeros, se realiza una medición de los buses sin pasajeros denominada prueba en blanco. Dicha prueba consiste en un recorrido de operación habitual con la diferencia de no permitir el ingreso de pasajeros, realizando las mismas paradas y tratando de simular el mismo ciclo de marcha.

Se trabaja en el primer horario (horario pico mañana) de lunes a viernes en la semana de 31 de noviembre al 4 de diciembre. Se esperaba evaluar los 31 buses sin pasajeros durante el horario pico con un orden de salida por día, como se indica en la **Tabla 11**. Sin embargo, como se observa en la **Tabla 12**, el cumplimiento solo se dio en el 83.87% de los buses debido a dificultades en la coordinación de los controladores de patio en base al cumplimiento de las frecuencias exigidas y a fallas técnicas de las unidades que limitaban su funcionamiento.

Por otro lado, el 6.45 % del total, representado por 2 buses diésel de la Ruta 4515, no cumplieron el horario respectivo, originando un reacomodo de fechas para las próximas mediciones (ver el nuevo orden en **Tabla 11**). Finalmente, 2 buses no realizaron sus mediciones respectivas por una confusión de programación y/o problemas técnicos del bus,

estos son: el Bus 4 (Placa: AXD850) y el Bus 30 (Placa: B3P790), correspondiente a un bus diésel Ruta 201 y bus GNV Ruta 4515, respectivamente.

Tabla 11: Mediciones en la semana en blanco

Ruta	Bus	N° de Placa	Combustible	Día	Bloque horario	Cumplimiento de bus (*)
201	Bus 1	BCM835	Eléctrico	30/11/2020	Mañana	si
	Bus 2	AXD723	Diésel	30/11/2020	Mañana	si
	Bus 3	AXD864	Diésel	01/12/2020	Mañana	si
	Bus 4	AXD850	Diésel	02/12/2020	Mañana	Bus 5: AXD872
	Bus 5	AXD872	Diésel	03/12/2020	Mañana	si
	Bus 6	AXD919	Diésel	04/12/2020	Mañana	si
	Bus 7	AWI780	GNV	30/11/2020	Mañana	si
	Bus 8	AWH728	GNV	01/12/2020	Mañana	si
	Bus 9	AWI779	GNV	02/12/2020	Mañana	si
	Bus 10	AWY802	GNV	03/12/2020	Mañana	si
	Bus 11	AXC939	GNV	04/12/2020	Mañana	si
107	Bus 12	AXV819	Diésel	30/11/2020	Mañana	si
	Bus 13	AXW902	Diésel	01/12/2020	Mañana	si
	Bus 14	AXY736	Diésel	02/12/2020	Mañana	si
	Bus 15	AXY911	Diésel	03/12/2020	Mañana	si
	Bus 16	AXZ789	Diésel	04/12/2020	Mañana	si
	Bus 17	AWE760	GNV	30/11/2020	Mañana	si
	Bus 18	AWE762	GNV	01/12/2020	Mañana	si
	Bus 19	AWE772	GNV	02/12/2020	Mañana	si
	Bus 20	AWE773	GNV	03/12/2020	Mañana	si
	Bus 21	AWE778	GNV	04/12/2020	Mañana	si
4515	Bus 22	B3D758	Diésel	30/11/2020	Mañana	si
	Bus 23	A0H759	Diésel	01/12/2020	Mañana	Bus 24: B3O741
	Bus 24	B3O741	Diésel	02/12/2020	Mañana	Bus 25: C3G703
	Bus 25	C3G703	Diésel	03/12/2020	Mañana	Bus 23: A0H759
	Bus 26	D3I701	Diésel	04/12/2020	Mañana	si
	Bus 27	B3P750	GNV	30/11/2020	Mañana	si
	Bus 28	B4S747	GNV	01/12/2020	Mañana	si
	Bus 29	C3M708	GNV	02/12/2020	Mañana	si
	Bus 30	B3P790	GNV	03/12/2020	Mañana	Bus 27: B3P750
	Bus 31	B8A711	GNV	04/12/2020	Mañana	si

(*): Se colocará un “si” por el cumplimiento de la salida del bus en relación a su número de bus y placa. Cuando no se haya cumplido, se colocará el número de bus y placa que reemplazó el monitoreo.

Tabla 12: Cumplimiento de buses en la medición en blanco

Casos (*)	N° de buses	Porcentaje de buses (%)
Cumplimiento de medición en blanco en sus días programados	26	83.87
Cumplimiento de medición en blanco en diferentes días	3	9.68
No se realiza su medición en blanco	2	6.45
Total	31	100

(*) El cumplimiento de un bus se considera cuando se recorre la ruta completa (ida y vuelta) en sus horarios programados Hora Pico Mañana y Hora Pico Tarde.

3.5.2. Campaña de Mediciones

La campaña de monitoreo estuvo orientada a evaluar el rendimiento de 15 buses (en las rutas 201, 107 y 4515) que consumen gas natural vehicular (GNV), 15 buses (en cada una de las 3 mismas rutas) que consumen Diesel (DBS-50) y 1 bus eléctrico (únicamente en la ruta 201). En total se realizaron 4 mediciones por bus en horario pico, las cuales se han comparado de acuerdo con lo planificado y 2 mediciones en valle para los buses de la ruta 201 y 107 La cantidad de mediciones suman un total de 124 por los 31 buses analizados, como se muestra a continuación en la **Tabla 13**.

Tabla 13: Cantidad de mediciones de acuerdo a la ruta y combustible según los TdR

Ruta	Combustible	N° de buses	Mediciones Pico	Mediciones Valle
201	Eléctrico	1	4	2
201	Diésel	5	20	10
201	GNV	5	20	10
107	Diésel	5	20	10
107	GNV	5	20	10
4515	Diésel	5	20	0
4515	GNV	5	20	0
<i>Total</i>		31	124	42

Las mediciones son en un recorrido completo o “vuelta completa”; es decir Norte-Sur-Norte y Este-Oeste-Este. De esta forma, para los 31 buses se tiene: 1 medición en hora punta mañana en la semana 1, 1 medición en hora punta tarde en la semana 1, 1 medición en hora punta mañana en la semana 2 y 1 medición en hora punta tarde en la semana 2 El horario de cada una de las 4 mediciones horario pico se muestran en la **Tabla 14**.

Adicionalmente, con fines de mejorar los resultados del presente estudio, se realizó una medición adicional en horario valle aproximadamente entre 9:00 y 11:00 horas (según programación del operador) para las rutas 107 y 201 como se mostró en la tabla anterior adicionando 2 mediciones (1 medición por semana) a las 4 solicitadas en la planificación.

Dado que realizar una medición adicional para los buses 4515 significaría un perjuicio mayor para el operador, se decidió no realizar mediciones en valle para la ruta 4515. A continuación, se muestra el calendario de salidas acordado.

Tabla 14: Calendario preliminar de mediciones

Ruta	Combustible	Turno	Días de monitoreo							
			Primera semana (7/12/2020 – 11/12/2020)		Segunda semana (14/12/2020 – 18/12/2020)					
			Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes			
201	Eléctrico	Hora pico mañana	Bus 1							
	Diésel		Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6			
	GNV		Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10	Bus 11			
	Eléctrico	Valle	Bus 1							
	Diésel		Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6			
	GNV		Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10	Bus 11			
	107	Eléctrico	Hora pico tarde	Bus 1						
		Diésel		Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6		
		GNV		Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10	Bus 11		
		4515	Diésel	Hora pico mañana	Bus 12	Bus 13	Bus 14	Bus 15	Bus 16	
					GNV	Bus 17	Bus 18	Bus 19	Bus 20	Bus 21
					Diésel	Bus 12	Bus 13	Bus 14	Bus 15	Bus 16
GNV			Hora pico mañana	Bus 17	Bus 18	Bus 19	Bus 20	Bus 21		
				Diésel	Bus 12	Bus 13	Bus 14	Bus 15	Bus 16	
				GNV	Bus 17	Bus 18	Bus 19	Bus 20	Bus 21	
4515		Diésel	Hora pico mañana	Bus 22	Bus 23	Bus 24	Bus 25	Bus 26		
				GNV	Bus 27	Bus 28	Bus 29	Bus 30	Bus 31	
		GNV	Hora pico mañana	Bus 22	Bus 23	Bus 24	Bus 25	Bus 26		
	GNV			Bus 27	Bus 28	Bus 29	Bus 30	Bus 31		

3.5.2.1. Primera semana de medición

La primera medición se realizó en la semana del 7 al 11 de diciembre del 2020. Según la **Tabla 15**, se muestra el cumplimiento del monitoreo en el 54.84% de buses en relación con sus días de monitoreo en puesta en blanco; un 12.90% de buses se monitorearon en días no correspondientes, en la mayoría de los casos debido a una falla técnica del bus al cual le correspondía salir a campo. Se muestra un porcentaje significativo de 32.26% de buses que no se pudieron monitorear, de estos 10 buses no se pudieron 6 debido al día feriado (martes 8 de diciembre), día que no pudo realizarse la medición por ser un día atípico y no representativo, los otros 4 correspondientes a fallas técnicas y de programación de la Ruta 4515. Por este motivo se realizaron reprogramaciones de dichos buses y salidas que se describen en la sección 3.4.3

Tabla 15: Cumplimiento de los buses en la primera medición

Casos (*)	N° de buses	Porcentaje de buses (%)
Cumplimiento con su salida de monitoreo en su día respectivo en relación a la semana en blanco	17	54.84
Cumplimiento con su salida de monitoreo, pero en días diferentes a su puesta en blanco	4	12.90
No cumplimiento en su salida (no sale a monitorear)	10	32.26
Total	31	100

(*) El cumplimiento de un bus se considera cuando se recorre la ruta completa (ida y vuelta) en sus horarios programados Hora Pico Mañana y Hora Pico Tarde. FUENTE: Elaboración propia.

3.5.2.2. Segunda semana de medición

La segunda medición, realizada en la semana del 14 al 18 de diciembre del 2020, presentó mayor cumplimiento debido a la experiencia de la semana en blanco y la primera semana de monitoreo, respectivamente. Se observa en la Tabla 16, una mejora en el cumplimiento de las mediciones. Solo 3 buses no salieron a su recorrido programado por fallas técnica de los buses de la Ruta 4515.

Tabla 16: Cumplimiento de los buses en la segunda medición

Casos (*)	N° de buses	Porcentaje de buses (%)
Cumplimiento con su salida de monitoreo en su día respectivo en relación a la semana en blanco	24	77.42
Cumplimiento con su salida de monitoreo, pero en días diferentes a su puesta en blanco	4	12.90
No cumplimiento en su salida (no sale a monitorear)	3	9.68
Total	31	100

(*) El cumplimiento de un bus se considera cuando se recorre la ruta completa (ida y vuelta) en sus horarios programados Hora Pico Mañana y Hora Pico Tarde.

3.5.3. Reprogramaciones

Como se observó anteriormente en la **Tabla 15** y Tabla 16, no se realizaron todas las mediciones adecuadamente debido a los problemas técnicos y de programación operativa interna en las rutas durante las dos semanas de monitoreo. Por ello, Se reprogramó las mediciones en los buses que presentaron estos incumplimientos cuyas características se detallan en la tabla 17 para alcanzar la planificación completa. Estas se realizarían en las

semanas del 21 al 25 de diciembre del 2020 y del 28 de diciembre del 2020 al 01 de enero del 2021, sin embargo, ambas semanas presenta días festivos en el calendario, por lo cual solo pueden realizarse del 21 al 23 y del 28 al 30, respectivamente. Por lo que las mediciones faltantes en los días correspondientes a los días de la semana jueves y viernes, fueron reprogramadas para la semana del 11 al 15 de enero del 2021 (Semana 5).

Adicionalmente, en la semana 5 se reprogramaron los buses a diésel de la Ruta 201, puesto que, en un análisis estadístico realizado con los datos obtenidos preliminarmente, se verificó que dichas mediciones de rendimiento no presentaban una muestra homogénea.

Por otro lado, las mediciones en puesta en blanco que no lograron realizarse en su semana respectiva (Bus N° 4 y N° 30), no fueron reprogramadas por la logística y costo adicional que conlleva la petición de salida a ruta un bus sin pasajeros.

En la **Tabla 17**, se resumen los días de monitoreo de cada bus con colores respectivos, los cuales se explican a continuación:

- Verde, los buses que completaron sus mediciones según lo planificado, 3 celdas verdes indican cumplimiento total de 1 medición en blanco, 2 mediciones en semana 1 y 2 mediciones en semana 2
- Turquesa para los buses que cumplieron con las 4 mediciones en horario pico, pero no en los mismos días asignados a su medición en blanco.
- Amarillo para las mediciones realizadas en fechas no programadas, pero que fueron reemplazadas en las semanas de reprogramaciones.
- Anaranjado los días que los buses no salieron a sus mediciones en todo el día.
- Rojo para los buses que no cumplen con lo planificado, contando solo con 2 o 3 mediciones en horario pico.

Tabla 17: Reprogramaciones para alcanzar el Cumplimiento de mediciones planificadas

Ruta	Combustible	Bus	Programación inicial			Reprogramación c/pasajeros			
			Blanco (31/11 - 04/12/2020)	Semana 1 (07/12 - 11/12/2020)	Semana 2 (14/12 - 18/12/2020)	Semana 3 (21/12 - 23/12/2020)	Semana 4 (28/12 - 30/01/2020)	Semana 5 (11/01 - 15/01/2021)	Semana 6 (15/02 - 19/02/2021)
201	Eléctrico	Bus 1	lun, 30 / 11 / 20	lun, 7 / 12 / 20	lun, 14 / 12 / 20				
		Bus 2	lun, 30 / 11 / 20	lun, 7 / 12 / 20	lun, 14 / 12 / 20				
	Diésel	Bus 3	mar, 1 / 12 / 20	mié, 9 / 12 / 20	mar, 15 / 12 / 20	mar, 22 / 12 / 20			lun, 11 / 01 / 21****
		Bus 4	no salió (**)	no salió	mié, 16 / 12 / 20	mié, 23 / 12 / 20			mié, 13 / 01 / 21
		Bus 5	jue, 3 / 12 / 20	jue, 10 / 12 / 20	jue, 17 / 12 / 20				jue, 14 / 01 / 21
		Bus 6	vie, 4 / 12 / 20	vie, 11 / 12 / 20	vie, 18 / 12 / 20				vie, 15 / 01 / 21
		Bus 7	lun, 30 / 11 / 20	lun, 7 / 12 / 20	lun, 14 / 12 / 20				
	GNV	Bus 8	mar, 1 / 12 / 20	mié, 9 / 12 / 20	mar, 15 / 12 / 20	mar, 22 / 12 / 20			
		Bus 9	mié, 2 / 12 / 20	no salió	mié, 16 / 12 / 20	mié, 23 / 12 / 20			
		Bus 10	jue, 3 / 12 / 20	jue, 10 / 12 / 20	jue, 17 / 12 / 20				
		Bus 11	vie, 4 / 12 / 20	vie, 11 / 12 / 20	vie, 18 / 12 / 20				
107	Diésel	Bus 12	lun, 30 / 11 / 20	lun, 7 / 12 / 20	lun, 14 / 12 / 20				
		Bus 13	mar, 1 / 12 / 20	no salió	mié, 16 / 12 / 20	mar, 22 / 12 / 20	mar, 29 / 12 / 20		
		Bus 14	mié, 2 / 12 / 20	mié, 9 / 12 / 20	mar, 15 / 12 / 20	mié, 23 / 12 / 20			
		Bus 15	jue, 3 / 12 / 20	jue, 10 / 12 / 20	jue, 17 / 12 / 20				
		Bus 16	vie, 4 / 12 / 20	vie, 11 / 12 / 20	vie, 18 / 12 / 20				
		Bus 17	lun, 30 / 11 / 20	lun, 7 / 12 / 20	lun, 14 / 12 / 20				
	GNV	Bus 18	mar, 1 / 12 / 20	no salió	mar, 15 / 12 / 20	mar, 22 / 12 / 20			
		Bus 19	mié, 2 / 12 / 20	mié, 9 / 12 / 20	mié, 16 / 12 / 20				
		Bus 20	jue, 3 / 12 / 20	jue, 10 / 12 / 20	jue, 17 / 12 / 20				
		Bus 21	vie, 4 / 12 / 20	vie, 11 / 12 / 20	vie, 18 / 12 / 20				
		Bus 22	lun, 30 / 11 / 20	no salió	lun, 14 / 12 / 20	lun, 21 / 12 / 20			
4515	Diésel	Bus 23	jue, 3 / 12 / 20	jue, 10 / 12 / 20	mar, 15 / 12 / 20				
		Bus 24	mar, 1 / 12 / 20	lun, 7 / 12 / 20	jue, 17 / 12 / 20	mar, 22 / 12 / 20	mar, 29 / 12 / 20		
		Bus 25	mié, 2 / 12 / 20	mié, 9 / 12 / 20 (***)	no salió	mié, 23 / 12 / 20 (*)	mié, 30 / 12 / 20	jue, 07 / 01 / 21 (*)	
		Bus 26	vie, 4 / 12 / 20	no salió	vie, 18 / 12 / 20			vie, 08 / 01 / 21	
		Bus 27	lun, 30 / 11 / 20	lun, 7 / 12 / 20	lun, 14 / 12 / 20				
	GNV	Bus 28	mar, 1 / 12 / 20	jue, 10 / 12 / 20	mar, 15 / 12 / 20	mar, 22 / 12 / 20			
		Bus 29	mié, 2 / 12 / 20	no salió	mié, 16 / 12 / 20 (*)	mié, 23 / 12 / 20	mié, 30 / 12 / 20	lun, 11 / 01 / 21 mié 13/ 01 /21 (*)	
		Bus 30	no salió (**)	no salió	jue, 17 / 12 / 20			lun, 15 / 02 / 21(*) mié, 17 / 02 / 21(*)	
					vie, 18 / 12 / 20			mar, 16 / 02 / 21 (*) jue, 18 / 02 / 21 (*)	
		Bus 31	vie, 4 / 12 / 20	no salió	no salió			mar, 12 / 01 / 21(*) vie, 15 / 01 / 21 (*)	lun, 15 / 02 / 21(*)mié, 17 / 02 / 21(*) mar, 16 / 02 / 21 (*) jue, 18 / 02 / 21 (*) vie, 19 / 02 / 21 (*)

LEYENDA:
 Medición no considerada
 No sale el bus a su recorrido

Bus que no cumple con planificación
 Cumplimiento en su totalidad
 Cumplimiento con observaciones

(*) Solo sale en hora pico mañana por día
(**) No se reprograma la puesta en blanco
(***) No sale en horario valle
(****) Se asignó una medición del Bus 24 para el cumplimiento de los TdR

Como resultado, la **Tabla 18** indica que los 31 buses cumplieron con las 4 mediciones en horario pico como se solicitó en la planificación, es decir se cuenta con un total de 124 mediciones. De los 31 buses, 25 monitorearon en los mismos días de la semana con relación a su medición en blanco y 6 lo hicieron en días diferentes a su medición en blanco.

Por otro lado, 2 buses no monitorearon en sus mediciones en blanco, el Bus 4 (ruta 201 a diésel) y el Bus 30 (ruta 4515 a gas natural). Mientras que el Bus 2 (ruta 201 diésel) es el único bus que no cuenta con una medición en valle. Es decir, solo se realizaron 41 mediciones en valle de las 42 programadas o 97.62 % del total.

Tabla 18: Cumplimiento final de los buses en las mediciones

Casos	N° de buses	Porcentaje de buses (%)
Cumplimiento de monitoreo del bus según los TdR (4 mediciones en horario pico)	25	80.65
Cumplimiento de mediciones mínimas según los TdR pero en diferentes días	6	19.35
No cumplimiento con los TdR	0	0
Total	31	100

(*) El cumplimiento de un bus se considera cuando se recorre la ruta completa (ida y vuelta) en sus horarios programados Hora Pico Mañana y Hora Pico Tarde. FUENTE:

Es importante mencionar que en la ciudad de Lima Metropolitana solo existe un único bús eléctrico operando en el sistema de rutas concesionadas; específicamente en el corredor rojo ruta 201. Sin embargo como se muestra en la **Figura 8** los resultados y comparaciones no requieren aumentar las muestras o mediciones de buses electricos en las otras dos rutas dado que las diferencias de resultados son hasta de un 500% respecto al diesel en ambos escenarios y el GNV donde la diferencia entre estos ultimos es mas sensible.

3.6. Tratamiento de Datos

A continuación, se presenta la metodología utilizada para el procesamiento de datos, específicamente de los rendimientos en horario pico (mañana y tarde) obtenidos en las 4 mediciones en condiciones normales (con pasajeros) de los 31 buses monitoreados.

El procesamiento de datos se realizó en dos fases: (i) discriminación de valores atípicos por el método de Box plot o Diagrama de cajas y bigotes; (ii) intervalos de confianza mediante la dispersión de T-Student a un intervalo de confianza del 99%. La primera fase se aplicó a

todos los datos de rendimientos, es decir, a 136 mediciones en hora pico, mientras que la segunda fase se realizó a los promedios determinados para buses, luego de la primera fase

3.6.1. Valores Atípicos

La discriminación de rendimientos por valores atípicos tiene como fin determinar la muestra estadísticamente representativa para obtener un rendimiento promedio para cada bus. Ello se realizó bajo dos filtros:

Trabajo en campo: se separó los valores atípicos considerados bajo un criterio conservador del equipo especializado. Los factores que determinaron que un valor es inusual dependió de las fallas detectadas en campo, tales como fugas de combustible o pistolas de abastecimiento averiadas.

- Diagrama Box plot (de cajas): esta técnica gráfica permite determinar los valores atípicos que son discordantes con la muestra analizada, suponiendo una asimetría de distribución del 50% central de datos.

3.6.2. Intervalos de Confianza

La generación de intervalos de confianza se realizó con el fin de evitar sesgos ocasionados al promediar valores de rendimientos, los cuales no siempre son representativos para una población total de datos.

Considerando nuestros promedios por bus obtenidos luego de discriminar los valores atípicos como una muestra aleatoria representativa de rendimientos de buses en Lima Metropolitana, se puede definir un intervalo de confianza a un cierto porcentaje. Para fines del estudio se tuvo en cuenta lo siguiente:

- Un nivel de confianza del 99%, el cual permite solo descartar extremos muy bajos o muy altos de rendimientos y resulta factible estadísticamente, por ejemplo, a un nivel de confianza del 95% al tener una muestra menor o igual a 20 datos el intervalo se reduciría significativamente descartando la mayoría de la data recolectada.
- La muestra utilizada para determinar los intervalos de confianza son los rendimientos que pasaron el filtro de trabajo de campo, debido a que estos datos discordantes sesgarían el intervalo a generar.
- Estos intervalos de confianza se generaron para los buses diésel y GNV de las tres rutas monitoreadas. No se aplicó a los rendimientos del bus eléctrico puesto que solo se cuenta

con 4 datos y 1 rendimiento promedio por las razones antes explicadas en la sección 3.4, por lo que el resultado obtenido se considera como representativa.

- Para determinar que los intervalos responden a la data analizada, se determina a la par los coeficientes de variación (C.V) entre los rendimientos de buses analizados, ello con el fin de demostrar que ante una posible eliminación de rendimientos el coeficiente se ha reducido indicando que la muestra es homogénea (no presenta dispersión) y el promedio final es representativo. Se consideró un C.V hasta del 10% como homogéneo bajo un criterio aceptable en el tratamiento estadístico.

La determinación de los intervalos se realiza bajo la siguiente ecuación:

Ecuación 10 Intervalos de confianza

$$X - T Student \times \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \leq \mu \leq X + T Student \times \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right)$$

Donde:

X: promedio o media poblacional

S: desviación estándar de la muestra

N: número de elementos en la muestra

T Student: valor $(1 - \frac{\alpha}{2}, n-1)$ de la distribución acumulativa T de Student

α : nivel de confianza 99%

μ : cualquier promedio a analizar

Interpretación:

Se tiene un nivel de confianza de 99% que el rendimiento promedio en horas pico de cierta ruta está en el intervalo determinado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta los resultados de la campaña de monitoreo, así como el cálculo del rendimiento, eficiencia, factor de emisión y contaminantes locales, obtenidos. Los resultados serán presentados de dos formas: por bus y por tipo de combustible en cada ruta.

4.1 Resultados principales por bus

Para el presente estudio se monitorearon 31 buses, de los cuales 1 era eléctrico¹, 15 a diésel o DB-5 y 15 a gas natural vehicular (GNV). A continuación, la **Tabla 19** presenta los resultados de las variables principales monitoreadas en campo, las cuales son necesarias para determinar el comportamiento del rendimiento y los factores de emisión de cada tipo de combustible y tecnología.

Tabla 19: Principales datos de las mediciones en hora pico mañana y tarde

Ruta	Bus	N° de pasajeros	Distancia en ruta (km)	Tiempo en ruta (hr)	Velocidad en ruta (km/hr)	Combustible consumido	Unidad
201	Bus 1	103	47.25	2.54	18.78	70.49	kWh
201	Bus 2	109	48.75	2.60	18.98	6.72	gal
201	Bus 3	108	49.75	2.90	17.95	5.17	gal
201	Bus 4	119	49.50	3.05	17.68	5.39	gal
201	Bus 5	106	49.50	2.70	18.68	7.44	gal
201	Bus 6	109	48.00	2.86	17.02	7.32	gal
201	Bus 7	124	47.85	2.73	17.73	36.72	m3
201	Bus 8	70	48.24	2.73	18.10	25.64	m3
201	Bus 9	99	48.94	3.20	16.33	29.74	m3
201	Bus 10	98	48.46	2.63	18.87	29.17	m3
201	Bus 11	85	48.55	2.75	18.06	29.99	m3
107	Bus 12	52	70.23	3.67	20.34	7.07	gal
107	Bus 13	69	68.88	3.60	20.97	6.73	gal
107	Bus 14	60	70.48	3.72	20.87	7.54	gal
107	Bus 15	62	68.90	3.38	20.95	6.51	gal
107	Bus 16	58	70.10	3.73	20.42	6.15	gal

¹ Se precisa que a la fecha de ejecución de las mediciones solo existe en Lima metropolitana un único bus eléctrico operando en la ruta 201

Continuación ...							
107	Bus 17	51	69.30	3.57	21.27	35.34	m3
107	Bus 18	62	70.55	4.07	18.52	37.86	m3
107	Bus 19	48	69.10	3.30	22.53	35.61	m3
107	Bus 20	52	69.60	3.25	22.15	32.93	m3
107	Bus 21	53	69.13	3.67	20.27	30.45	m3
4515	Bus 22	126	71.25	4.85	15.07	9.23	gal
4515	Bus 23	87	71.72	5.15	14.32	8.67	gal
4515	Bus 24	102	66.29	3.90	17.22	9.62	gal
4515	Bus 25	96	70.21	4.58	15.47	10.48	gal
4515	Bus 26	99	70.41	3.68	19.72	6.90	gal
4515	Bus 27	69	71.88	4.70	15.67	61.44	m3
4515	Bus 28	96	70.25	5.21	13.92	51.42	m3
4515	Bus 29	79	67.71	4.64	15.80	38.95	m3
4515	Bus 30	58	69.61	3.66	19.08	42.23	m3
4515	Bus 31	64	69.68	3.63	19.19	31.87	m3

4.2 Por tipo de combustible en cada ruta

En primer lugar, se determinó los promedios de los datos principales por tipo de combustible en cada ruta, del promedio de número de pasajeros los cuales según la **Tabla 20**, inusualmente se obtiene mayor número de pasajeros para los buses a diésel en la ruta 201 y 4515, cabe mencionar que ambos pares de buses (un bus a GNV y un bus a diésel) que recorrieron cada día de monitoreo salieron en las mismas condiciones y mismo horario (en su mayoría), por lo que estas diferencias fueron espontáneas.

Además, se presenta el promedio de distancia en ruta, las cuales se espera que estos datos sean iguales o que presenten la mínima variación posible entre los tipos de combustibles, puesto que esta distancia presentada es entre el paradero inicial y final de cada ruta, cuyas diferencias solo se debió en el recorrido de media vuelta. Mientras que el tiempo en ruta de paradero inicial a final en una vuelta completa, dependerá del congestionamiento vehicular promedio entre las horas pico de medición, se observa que son similares entre los buses de cada ruta, siendo la Ruta 4515 la que mayor tiempo realiza debido al congestionamiento de su recorrido (por ejemplo, en la Av. Abancay) a pesar de recorrer menos kilómetros. Asimismo, la velocidad determinada dependerá de la distancia y tiempo de recorrido, por ello, se tiene menor velocidad en ruta ara la 4515.

Por último, el combustible de consumo se tomó de grifo a grifo y este se encuentra en las unidades respectivas de cada combustible, galones para el combustible a diésel, metros cúbicos para gas el natural y rendimiento energético para los buses eléctrico representado en kilovatios hora (kWh).

Tabla 20: Datos principales del monitoreo de buses en horario pico – Por ruta

Ruta	Bus	N° de pasajeros	Distancia en ruta (km)	Tiempo en ruta (hr)	Velocidad en ruta (km/hr)	Combustible consumido	Unidad
201	DIÉSEL	110	49.10	2.82	18.06	6.41	gal
201	GNV	95	48.41	2.81	17.82	30.25	m3
201	ELÉCTRICO	103	47.25	2.54	18.78	70.49	kWh
107	DIÉSEL	60	69.72	3.62	20.71	6.80	gal
107	GNV	53	69.54	3.57	20.95	34.44	m3
4515	DIÉSEL	102	69.98	4.43	16.36	8.98	gal
4515	GNV	73	69.83	4.37	16.73	45.18	m3

Cabe señalar que los datos trabajados para los buses a diésel y Diesel B-5 provienen de una misma medición de rendimiento. La diferencia del uso de este combustible se observará cuando se determine el factor de emisión, puesto que serán diferenciados mediante su poder calorífico respectivo mediante dos escenarios: (i) escenario 1, cuando el diésel se encuentra al 100% de su pureza, y (ii) escenario 2, se refiere a un escenario real, donde se utilizó como combustible el Diésel B5 (DB-5), mezcla de combustibles en un 5% de biocombustible y 95% diésel.

Se determinó, además, mediante una distribución de T-Student, intervalos óptimos para rendimientos promedio de hora pico para cada tipo de combustible y cada ruta a un 99% de nivel de confianza. Además, se comprobó que la eliminación de los rendimientos de buses que no se encontraban en dicho intervalo reducía el coeficiente de variación a menos del 10% ($C.V. < 10\%$), es decir los datos restantes mostraban ser una muestra homogénea, sin dispersión de data.

La **Tabla 21**, muestra los resultados de rendimiento obtenidos por tipo de combustible, así como el rendimiento representado en unidades energéticas, determinado mediante la Ecuación 3.

De forma general, se observó que se recorrió mayor cantidad de kilómetros por unidad de combustible consumido para los buses a diésel y DB-5, es decir, por galón de diésel se recorre mayor distancia a diferencia del consumo de un metro cúbico de gas natural. Sin embargo, esta comparación no es dable, puesto que las unidades difieren de la naturaleza del combustible.

Tabla 21: Rendimiento y rendimiento energético de buses en horario pico – Por ruta

Ruta	Combustible	Rendimiento	Unidad	Rendimiento energético (Km/GJ)
201	DB-5	10.31	km/gal	83.12
201	Diésel	10.31	km/gal	76.65
201	GNV	1.86	km/m ³	51.56
201	Eléctrico	0.98	km/kWh	273.53
107	DB-5	11.75	km/gal	94.73
107	Diésel	11.75	km/gal	87.35
107	GNV	2.27	km/m ³	62.96
4515	DB-5	8.61	km/gal	69.45
4515	Diésel	8.61	km/gal	64.04
4515	GNV	1.78	km/m ³	49.53

4.2.1. Análisis de rendimiento y rendimiento energético

Se observa en el **Figura 8**, que el rendimiento energético representado en (km/GJ) fue menor para los buses a gas natural para las tres rutas de estudio, tal como se determinó en el análisis por pares de buses en la sección 5.1, esto significa que se recorrió menor cantidad de kilómetros por Giga-Joule generado por los buses a gas natural.

Lo anterior mencionado, se sustenta en el mecanismo de funcionamiento de los motores por tipo de combustible, donde los motores a diésel tienen mayor fuerza para generar un giro (torque) y un menor número de revoluciones por minuto, lo cual genera una mayor potencia del motor, por ende, se tiene un mejor rendimiento debido al ahorro del combustible. Caso contrario, ocurre con los buses a gas natural, donde se generan mayor número de revoluciones, que, si bien lo benefician en proporcionar mayores velocidades al bus, implica que se consuma mayor cantidad de combustible, resultando en menor rendimiento.

Adicionalmente, en los rendimientos obtenidos en la Ruta 201, se observa además que los buses eléctricos presentaron un rendimiento aproximadamente 5 veces mayor que los buses diésel, DB-5 y GNV. Los vehículos eléctricos contienen motores con mínimas partes móviles en su estructura, lo que provoca rozamientos casi inexistentes (giro del motor debido a campos electromagnéticos), por lo que presentan mayores rendimientos a comparación de los vehículos de combustión, los cuales pierden entre el 75 y 70% del rendimiento en energía calorífica generada por el rozamiento del gran número revoluciones.

Los buses a gas natural tienen un poder calorífico de 0.04 GJ/m³, el cual es menor al del combustible diésel (0.13 GJ/gal) o al del DB-5 (0.14 GJ/gal), por lo que se esperaría que el rendimiento energético sea menor para los buses a GNV puesto se requiere mayor cantidad de combustible para producir una unidad energética. Adicionalmente, la eficiencia de los

motores a gas natural, explicado anteriormente, aumentan esta diferencia de rendimiento energético, generando una ventaja en los buses a diésel y más aún en los de DB-5, puesto que estos últimos mencionados pueden recorrer mayor cantidad de kilómetros recorrido por unidad de GJ consumido.

Los resultados, indicaron que el bus eléctrico presentó el mayor rendimiento energético con relación a los otros combustibles. Seguido del combustible DB-5 cuyo rendimiento energético es ligeramente mayor hasta en 7 km/GJ con relación a los buses a diésel al 100%. Y finalmente, los buses a gas natural con el menor rendimiento energético en las 3 rutas analizadas.

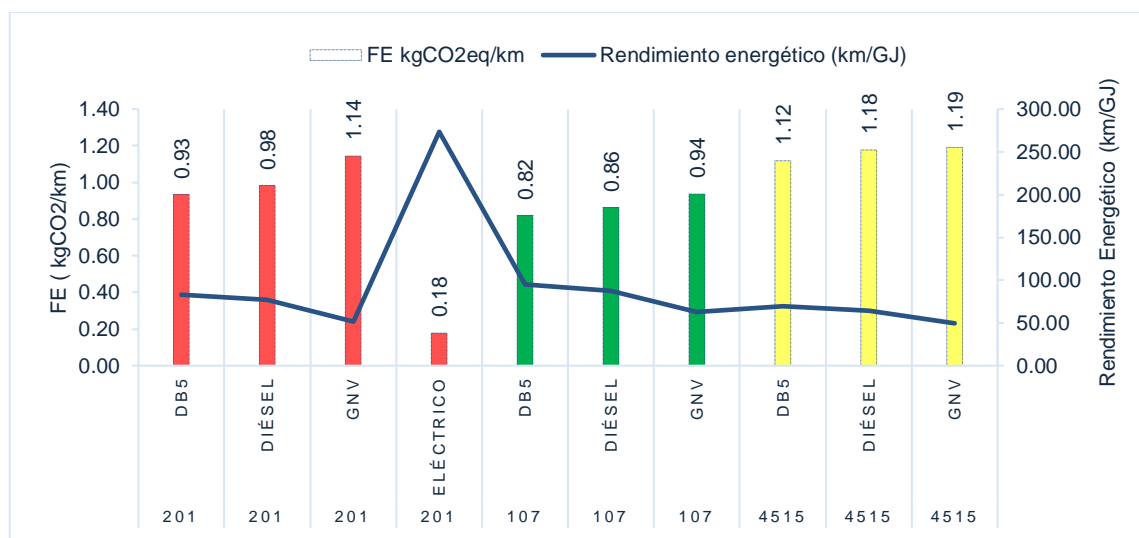


Figura 8. Rendimiento y rendimiento energético de buses en horario pico – Por ruta

4.2.2. Factor de emisión (FE) de GEI

A partir del rendimiento energético determinado (ver **Tabla 21**), la **Tabla 22** muestra los resultados de los factores de emisión respectivos para los gases de efecto invernadero (GEI): CO₂, CH₄, N₂O y finalmente el factor de emisión de CO₂ equivalente por kilómetro recorrido, para cada combustible de cada una de las rutas monitoreadas en el presente estudio dependiendo de su potencial de calentamiento global

Tabla 22: Factores de emisión de GEI de buses en hora pico - Por ruta

Ruta	Combustible	Factor de emisión (gCO ₂ /km)	Factor de emisión (gCH ₄ /km)	Factor de emisión (gN ₂ O/km)	Factor de emisión (kgCO ₂ eq/km)	N° de pasajeros	FE per cápita (kgCO ₂ eq/km*persona)
201	DB-5	918.43	0.05	0.05	0.93	95	0.010
201	Diésel	966.77	0.05	0.05	0.98	95	0.010
201	GNV	1088.48	1.78	0.06	1.14	103	0.011
201	Eléctrico	177.72	0.00	0.00	0.18	110	0.002
107	DB-5	805.92	0.04	0.04	0.82	60	0.014
107	Diésel	848.34	0.04	0.04	0.86	60	0.014
107	GNV	891.44	1.46	0.05	0.94	53	0.018
4515	DB-5	1099.32	0.06	0.06	1.12	102	0.011
4515	Diésel	1157.17	0.06	0.06	1.18	102	0.012
4515	GNV	1133.28	1.86	0.06	1.19	73	0.016

4.2.2.1. Factor de emisión de CO₂

Se observó que los factores de emisión (gCO₂/km), fueron mayores para los buses a gas natural en las tres rutas monitoreadas, es decir, que se producirá mayor cantidad de dióxido de carbono por un mismo kilómetro recorrido a diferencia de los otros tipos de combustible.

En el **Figura 9**, se observa que la Ruta 201 presentó una variación de factores de emisión de -11% para el diésel, -16% para el DB-5 y -84% para el bus eléctrico, con relación al factor de emisión del gas natural. De la misma manera, la Ruta 107, presenta variaciones de disminución en los factores de emisiones de diésel y DB-5, con relación al del GNV, en -5% y -10%, respectivamente. Mientras que, para la Ruta 4515 el diésel presentó variaciones de sus factores de emisión de -3% y el DB-5 de -2% con relación al uso del gas natural. Ello se debe tanto a la cantidad de carbono en cada combustible y al rendimiento energético determinado anteriormente.

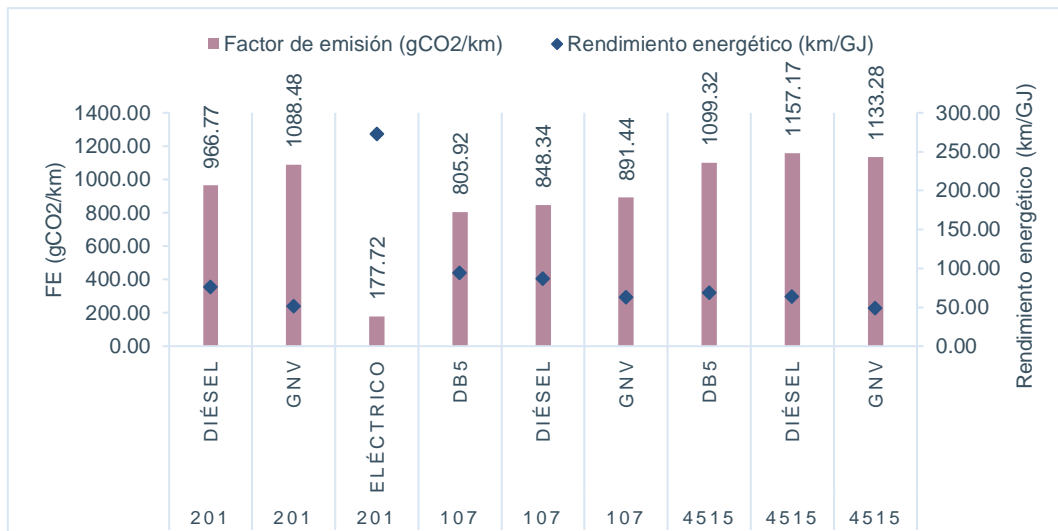


Figura 9: Factores de emisión en gCO2/km para buses en horario pico - Por ruta

Asimismo, los buses de la ruta 4515 presentaron los mayores factores de emisión de CO₂, ello por el menor rendimiento energético de sus buses. Cabe señalar que son buses de diferentes modelos y de años de fabricación más antiguos que los buses de las rutas 201 y 107, por lo cual el uso de estos buses afectaría directamente la reducción del rendimiento de los buses; por lo que en condiciones normales (sin pandemia y buses llenos de pasajeros en todas las rutas) la diferencia de rendimientos aumentaría beneficiando a los buses más nuevos. Como se observa en la **Tabla 20**, la ruta 4515 presenta las menores velocidades, por lo que el factor de congestión vehicular también afectaría al rendimiento energético de este.

Por el contrario, considerando buses de un mismo modelo y año de fabricación, los buses de la ruta 107 presenta menores factores de emisión y menor rendimiento energético por kilómetro recorrido, a diferencia de la ruta 201. Ello debido, que los buses de la ruta 107 trasladó una cantidad menor de pasajeros, aproximadamente la mitad que la ruta 201 y a una velocidad mayor, lo cual afectaría al menor rendimiento energético y, por ende, menor factor de emisión (ver Tabla 21).

4.2.2.2. Factor de emisión de CH₄ y N₂O

De igual forma, se determinó los factores de emisión para los gases de efecto invernadero: metano y óxido nitroso en el **Figura 10**. Los resultados indicaron que los factores de emisión del CH₄ son mayores para los buses a gas natural en todas las rutas monitoreadas, llegando a ser mayor en un 97% a diferencia del combustible a diésel y DB-5, por ser el metano el principal componente del combustible.

En primer lugar, se observa que en la Ruta 201 que el combustible GNV presenta un factor de emisión elevado representado por la barra verde con relación al CH₄, la cual tiene una variación porcentual del 97% mayor en comparación al diésel y del DB-5, aproximadamente. Mientras que, en relación a la producción de metano para los buses eléctrico, estos presentan una emisión de cero unidades de contaminante, por lo que la diferencia es del 100% en relación al gas natural.

En la Ruta 107, también se observa un factor de emisión del metano para el combustible GNV mayor, con una variación de 96.9% y 97.1% para el diésel y DB-5, respectivamente. Mientras que, para la Ruta 4515, la variación es del 96.7% para el diésel y 96.8% para el DB-5. Además, en la ruta 4515 el factor de emisión de CH₄ es mayor que las otras rutas, por el menor rendimiento energético presentado en sus buses.

Por otro lado, los resultados indicaron que los factores de emisión del N₂O, son muy similares entre los combustibles, con una variación de ± 0.01 para la Ruta 201 y 107, siendo mayor para los buses a gas natural y en la Ruta 4515 se presenta un comportamiento similar.

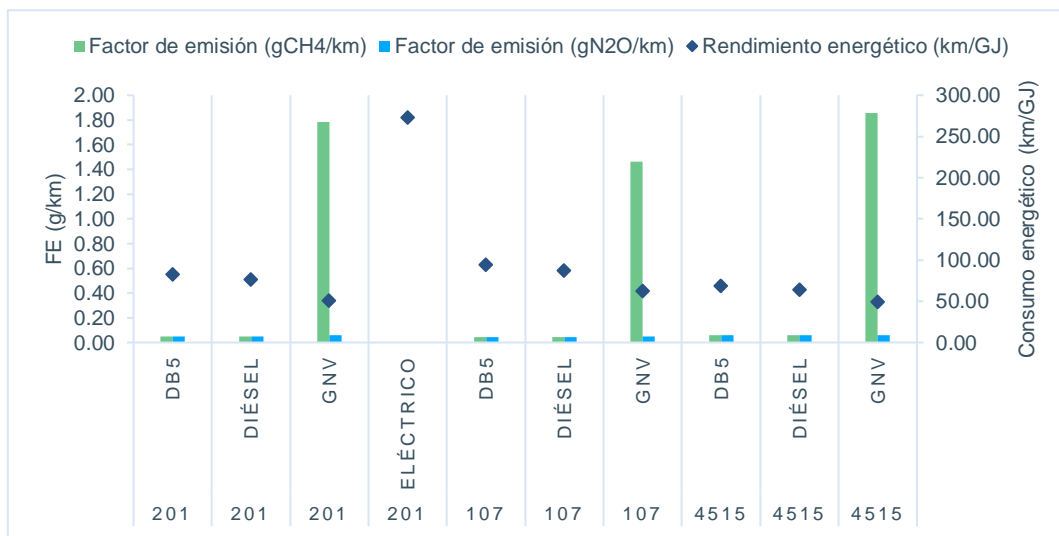


Figura 10. Factores de emisión de gCH₄/km y gN₂O/km para buses en horario pico – Por ruta

4.2.2.3. Factor de emisión promedio: CO₂ equivalente

Finalmente, se calculó el factor de emisión de CO₂ equivalente por kilómetro recorrido por tipo de combustible en cada ruta, mediante la suma de las emisiones obtenidas de CO₂, CH₄ y N₂O, considerando sus potenciales de calentamiento global respectivos.

En la **Figura 11**, se observa los resultados de dichos factores de emisión, donde se tiene que para las tres rutas los buses abastecidos a GNV generan mayor cantidad de emisiones de kgCO_{2eq} con relación al diésel (Escenario 1) y DB-5 (Escenario 2).

Como se observa en la **Figura 11**, los buses a diésel de la ruta 201 tienen un factor de emisión de 0.98 kgCO_{2eq}/km menor en un 14% con relación a los buses a GNV (1.14 kgCO_{2eq}/km), mientras que para el escenario 2 (escenario real) el combustible DB-5 produce 18% menos de cantidad de contaminante que los buses a GNV. El factor de emisión determinado para los buses eléctricos, indican que se evitaría el 84% de dióxido de carbono equivalente con relación al GNV, emitiendo 0.97 kgCO_{2eq}/km menos.

Para la Ruta 107, se observa que tiene los buses con menos generación de emisiones de gases de efecto invernadero con relación a las otras 2 rutas (201 y 4515), debido a la menor carga transportada y mayor velocidad en ruta. Los buses a GNV producen 8% más que los buses a diésel y 12% si el combustible es DB-5.

Finalmente, la Ruta 4515 es la que mayores emisiones presenta con relación a las otras dos rutas debido a su menor rendimiento y Factor de emisión, atribuible a su menor velocidad en ruta ocasionado por el congestionamiento vehicular de las avenidas de recorrido, el número de paraderos existentes y el tiempo extra que demora un pasajero en el pago de su pasaje dentro del bus. En dicha ruta los buses a GNV también son los que más emisiones de kgCO_{2eq} generaron, 1% con relación a los buses a diésel y 6% si estos son abastecidos con DB-5.

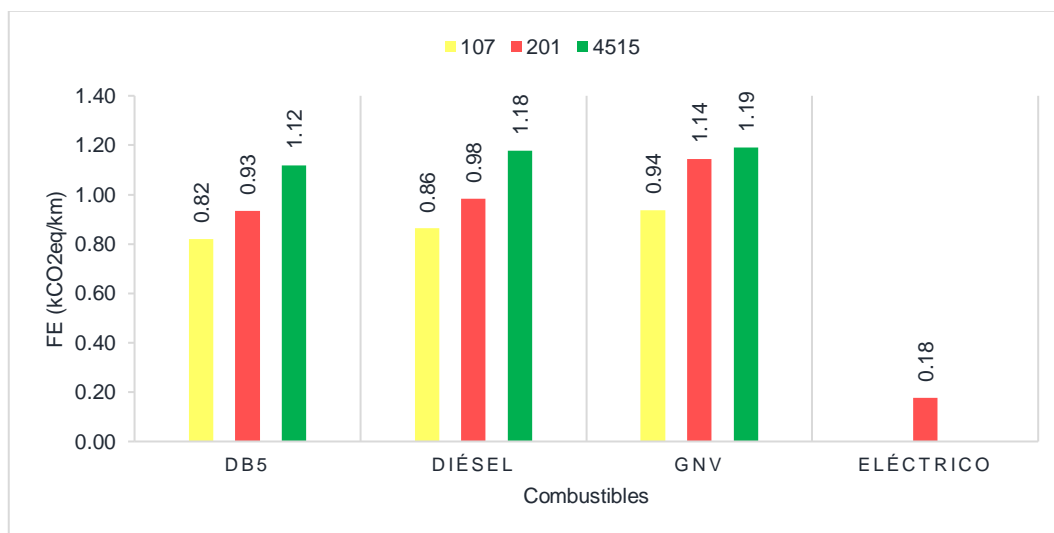


Figura 11. Factor de emisión promedio (kg CO₂ eq/km) de buses en hora pico – Por ruta

Para el logro de los resultados de la **Figura 11** se procesaron las parejas de datos obtenidos de cada bus en cada una de las rutas. En la ruta 201 se obtuvo un coeficiente de variación promedio superior al 30% (no homogéneos) por lo que es la ruta con mayor cantidad de reprogramaciones como se muestra en la tabla 17, la mayoría de los datos tienen un coeficiente de desviación estándar promedio de 0.25. La ruta 107 por otro lado presente los

mejores resultados estadísticos con desviaciones estándares promedio de 0.1 cuyos coeficientes de variación son homogéneos (menor al 30%) y por consiguiente tienen un reducido número de reprogramaciones. Finalmente, la ruta 4515 logró tener buenos resultados en el coeficiente de variación luego de las numerosas reprogramaciones, aunque con coeficientes de variación superiores a 0.2 lo que significa una mayor dispersión entre datos que deberían ser similares.

Se observó que el factor de emisión del metano en $\text{kgCO}_{2\text{eq}}/\text{km}$ es más representativo en los buses a gas natural en las tres rutas, debido a que el principal componente del gas natural es el metano. La **Figura 12**, señala que la contribución para las tres rutas fue de 3.28% de carbono equivalente, a comparación de los buses a diésel y DB-5 que representa solo un 0.11%. Por otro lado, la contribución del N_2O al factor de emisión determinada varía tanto para las tres rutas como para los tres tipos de combustible entre 1.58 a 1.61%, siendo mayor para el DB-5 y menor para GNV.

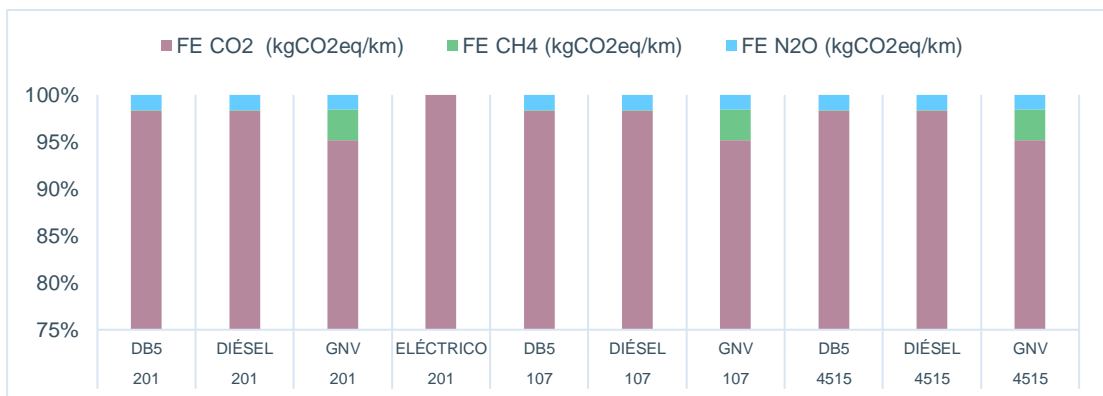


Figura 12. Contribución de los GEI al factor de emisión promedio ($\text{kg CO}_2 \text{ eq/km}$) en hora pico – Por ruta

4.3 Por tipo de combustible

Finalmente, se obtuvieron los valores promedios por tipo de combustible para el rendimiento en unidades volumétricas de combustible y en unidades energéticas (GJ), así como los factores de emisión para los gases de efecto invernadero.

Tabla 23: Rendimiento y factores de emisión GEI de buses en hora pico - Por tipo de combustible

Combustible	Rendimiento	Unidad	Rendimiento energético (Km/GJ)	Factor de emisión (gCO ₂ /km)	Factor de emisión (gCH ₄ /km)	Factor de emisión (gN ₂ O/km)	FE kgCO ₂ eq/km
DB-5	10.22	km/gal	82.43	941.22	0.05	0.05	0.96
DIÉSEL	10.22	km/gal	76.01	990.76	0.05	0.05	1.01
GNV	1.97	km/m ³	54.68	1037.73	1.70	0.06	1.09
ELÉCTRICO	0.98	km/kWh	273.53	177.72	0.00	0.00	0.18

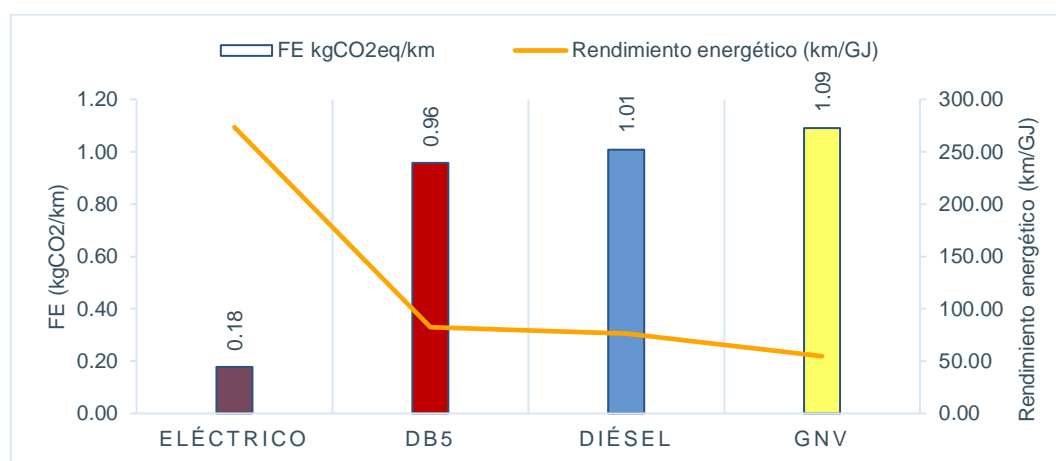


Figura 13. Factor de emisión y rendimiento energético por tipo de combustible

En la Tabla 23, se observa que cuando se realiza el análisis por tipo de combustible, el gas natural es el combustible que desprende una menor energía al momento de ocurrir la combustión de una unidad volumétrica del combustible, asimismo, es el menos eficiente, es decir que, para que un vehículo a gas natural recorra un kilómetro, necesita mayor cantidad de combustible de lo que necesitaría si utilizara diésel o biodiésel, esto se debe básicamente a que la eficiencia de un motor de un vehículo a gas natural es menor que la eficiencia de un motor de un vehículo a diésel debido a la relación de compresión que existe en un vehículo a gas natural (Delgado & Muncrief, 2015), por ende, el consumo de combustible es mucho mayor (ver Tabla 19).

Dicho esto, sería coherente pensar que las emisiones del GNV serían mayores que las emisiones del diésel o del biodiésel, sin embargo, como se mencionó antes, esto no depende solo del poder calorífico o del rendimiento, sino que también depende de los gramos de contaminante/GJ emitidos. Si bien se observa que el gas natural emite menor cantidad de CO₂/GJ (ver **Tabla 3:** Factor de emisión (kg/GJ) Tier 1 del IPCC 2006), lo cual se debe a que este tiene un contenido bajo de carbono comparado con el diésel, el mismo combustible emite mayor cantidad de CH₄/TJ debido a que contiene metano como hidrocarburo principal

de su composición, y al tener el metano un mayor poder de calentamiento, finalmente las emisiones en CO₂ equivalente son mayores para el gas natural.

Por otro lado, cuando se realiza un análisis por bus, se observa que el factor de emisión es mayor para la ruta 4515, mientras que el factor de emisión es menor para la ruta 107 para los tres tipos de combustible utilizados. Debido a que la tendencia es independiente del tipo de combustible, la única variable que genera esta diferencia es el rendimiento. Según el Instituto Mexicano de Transporte (2018), el rendimiento depende del peso del vehículo (considerando la carga del vehículo), tipo de vehículo, antigüedad, cambios de marcha, paradas y la velocidad de circulación. En el caso del tipo de vehículo, la tipología vehicular en las tres rutas es la misma, asimismo, los cambios de marcha y paradas son factores difíciles de estandarizar en pruebas pilotos y no son totalmente independientes del rendimiento, por lo que la diferencia se debe principalmente del peso del vehículo y la antigüedad de estos.

Como se observa en el **Figura 5**, tanto para los buses a GNV como los buses a diésel, la antigüedad de los vehículos de la ruta 4515 son mayores (2011 – 2012) comparado con la ruta 201 y 107, donde los buses son del 2017 – 2018, un bus de mayor antigüedad tiende a ser menos eficiente, pues requiere un mayor mantenimiento para un buen funcionamiento comparado con un vehículo nuevo (Zegarra, Sulén, & Bautista, 2006), por ende, esta diferencia de antigüedad explica el FE mayor para el caso de los buses de la 4515. Por otra parte, se observa que los buses de la ruta 201 y los buses de la ruta 107 tienen una antigüedad similar, por ende, la diferencia del factor de emisión se debe a la cantidad de pasajeros promedio por ruta; en la **Tabla 24** se observa que la cantidad de pasajeros en la 107 es de 56 personas, lo cual es menor al número de pasajeros promedio de la 201 (103 personas), explicando así la diferencia entre los factores de emisión de ambas rutas.

Tabla 24: Promedio de N° de pasajeros, distancia, tiempo y velocidad -Por ruta

Ruta	Promedio de N° de pasajeros	Promedio de Distancia en ruta (km)	Promedio de Tiempo en ruta (hr)	Promedio de Velocidad en ruta (km/hr)
201	103	48.25	2.72	18.22
107	56	69.63	3.60	20.83
4515	88	69.90	4.40	16.55

4.4 Análisis de mediciones en Blanco

Para la evaluación de variable pasajeros se utilizaron los resultados de las mediciones de la marcha blanca realizadas sin pasajeros simulando un recorrido habitual con el mismo número de paradas habituales en la hora punta mañana de cada una de las rutas; estos resultados fueron comparados con las mediciones de punta mañana en las semanas de medición 1 y 2 realizadas con pasajeros. Es importante mencionar que las rutas 201 y 107 están operando por disposiciones de la Autoridad de Transporte Urbano (ATU) únicamente con el aforo de pasajeros sentados impidiendo que suban pasajeros y que estos viajen de pie.

Para el análisis de resultados se utilizaron únicamente las distancias desde el paradero inicial hasta el paradero final en ambos sentidos por ser los kilómetros donde abordan los pasajeros; así mismo se consideraron únicamente los tiempos de paradero a paradero. Con estos valores se hicieron correcciones al consumo de combustible para las mediciones en punta mañana considerando la medición de marcha blanca como un consumo 0 y el recorrido de las semanas 1 y 2 como el diferencial de consumo de la medición menos el consumo de la marcha blanca atribuyendo el consumo adicional a los pasajeros asumiendo que la marcha blanca estuvo sometida a las mismas condiciones de tráfico (tiempo y velocidad promedio). La tabla muestra los resultados del análisis:

Tabla 25: Indicador de consumo por pasajero por ruta

Ruta	Combustible	Indicador de consumo por pasajero	Unidad
201	Eléctrico	1.37	kW/10 pasajeros
	Diésel	0.18	Gal/10 pasajeros
	GNV	0.53	m ³ /10 pasajeros
107	Diésel	0.06	Gal/10 pasajeros
	GNV	0.36	m ³ /10 pasajeros
4515	Diésel	0.15	Gal/10 pasajeros
	GNV	1.97	m ³ /10 pasajeros

La tabla 25 evidencia el impacto de la variable peso sobre el consumo de combustible, los pasajeros claramente son una representación de la variable peso por lo que la medición de la campa en blanco sin pasajeros comprueba el grado de afectación para posteriores análisis fuera del alcance del presente trabajo.

Tabla 26: Indicador promedio de consumo por pasajero por tipo de combustible

Combustible	Indicador promedio de consumo por pasajero	Unidad
Eléctrico	1.37	kW/10 pasajeros
Diésel	0.13	Gal/10 pasajeros
GNV	0.95	m ³ /10 pasajeros

La tabla 25 evidencia el impacto de la variable peso sobre el consumo de combustible, los pasajeros claramente son una representación de la variable peso por lo que la medición de la carga en blanco sin pasajeros comprueba el grado de afectación para posteriores análisis fuera del alcance del presente trabajo

La Tabla 26 muestra que para el bus eléctrico existe un indicador de 1.37 kW adicionales por cada 10 pasajeros que abordan la unidad; es decir el peso de los pasajeros logra aumentar en más de una unidad los Kw de consumo alterando el rendimiento (ecuación 1) y por consiguiente el rendimiento energético (ecuación 3) . Los buses diésel presentaron un indicador menor a todos; es decir que no se acercan a la unidad sino por consiguiente al cero, de 0.13 gal consumidos extras por cada 10 pasajeros adicionales evidenciando como el peso afecta en menor medida el rendimiento de un bus a diesel. Por último, los buses a GNV presentaron un indicador cercano a la unidad de 0.95 m³ de gas natural por cada 10 pasajeros transportados.

Para determinar los factores de emisión de CO₂ equivalente para las mediciones en blanco, primero se determinó el rendimiento promedio. Bajo el supuesto que el rendimiento de los buses sin pasajeros debe ser mayor a los buses con pasajeros, se discriminó los datos que no respondían a esta afirmación y con los restantes se determinó un rendimiento promedio más robusto.

Los resultados se muestran a continuación en la **Tabla 27**, donde los buses con carga 0 o sin pasajeros, siguen la tendencia de los resultados anteriores, puesto que el bus a gas natural es en definitiva el que presenta menor rendimiento energético y mayor factor de emisión en kgCO₂eq/km.

Tabla 27: Resultado de rendimiento y factores de emisión de GEI para buses en blanco – Por combustible

Combustible	Rendimiento	Unidades	Rendimiento energético (km/GJ)	Factor de emisión (gCO ₂ /km)	Factor de emisión (gCH ₄ /km)	Factor de emisión (gN ₂ O/km)	FE kgCO ₂ eq/km
DIÉSEL	14.96	km/gal	111.21	679.00	0.04	0.04	0.69
DB5	14.96	km/gal	120.61	645.05	0.03	0.03	0.66
GNV	2.81	km/m ³	78.10	718.80	1.18	0.04	0.76
ELÉCTRICO	1.15	km/kWh	318.55	152.60	0.00	0.00	0.15

Como se observa en Figura 14: Factores de emisión de GEI (kgCO₂/km) para buses en hora pico sin pasajeros - Por tipo de combustible Figura 14, los factores de emisión con pasajeros son mayores que los factores de emisión sin pasajeros, esto se debe a que cuando se lleva pasajeros en el vehículo el peso neto de este aumenta, por ende, se requiere un mayor esfuerzo por parte del vehículo, lo cual se traduce a un mayor consumo de combustible (Nogueira da Silva, 2006).

Además, se observa que, a pesar de trasladar una mayor carga, los buses eléctricos no aumentan considerablemente su factor de emisión de CO₂eq/km, aunque se ha demostrado que el consumo de energía consumido aumenta en relación de 1.37 por cada 10 pasajeros, la cantidad de energía consumida sigue siendo menor en relación a los buses a combustión, como se observa en la **Figura 15** presentó un factor de emisión per cápita menor a todos de 1.61 gCO₂/km*persona. Por otro lado, se observa que 1 persona transportada en bus a DB-5 dejaría de emitir 3.54 gramos de dióxido de carbono por kilómetro recorrido al dejar de usar un bus a gas natural, mientras que si se traslada en un bus eléctrico dejaría de emitir 13.42 gramos de dióxido de carbono.

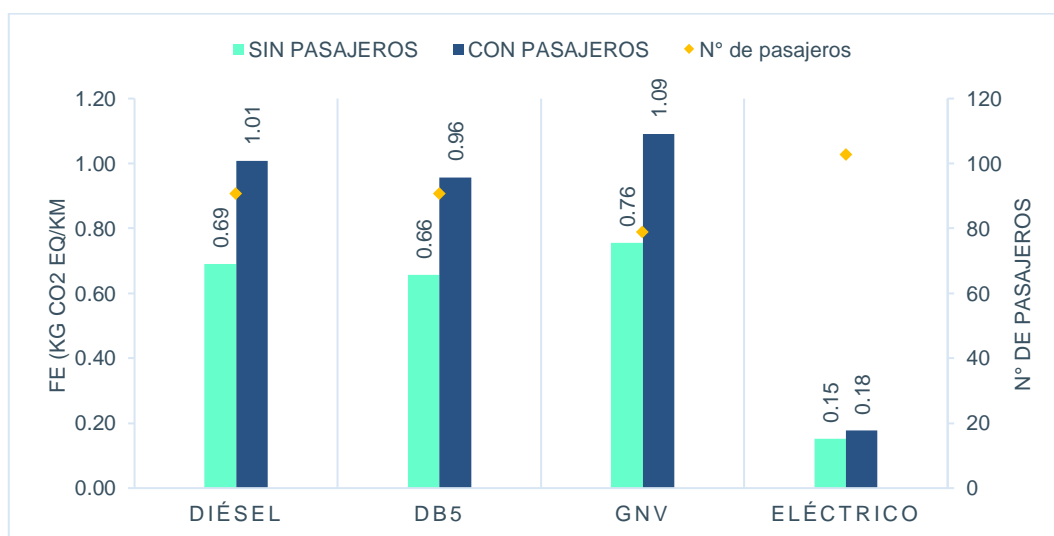


Figura 14. Factores de emisión de GEI (kgCO₂/km) para buses en hora pico sin pasajeros - Por tipo de combustible

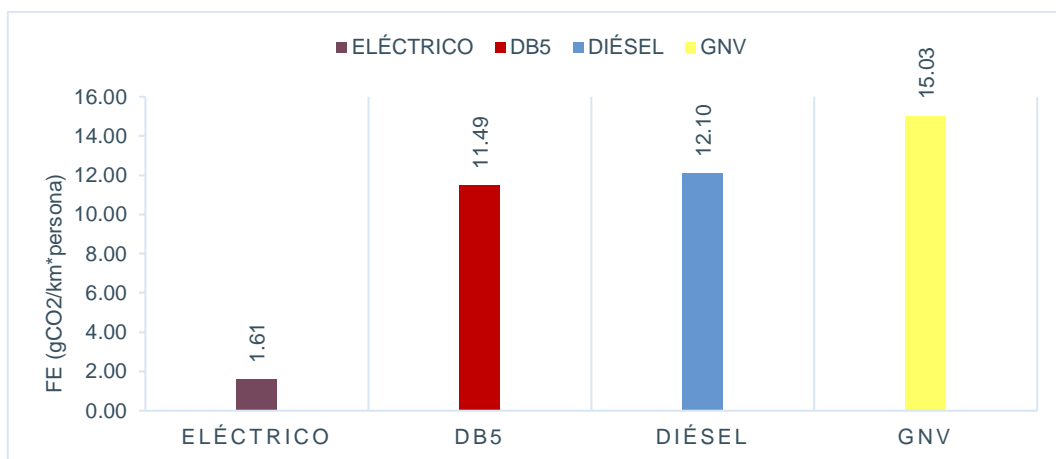


Figura 15. Factor de emisión de GEI per cápita (gCO2/km*persona) – Por combustible

4.5 Discusión de resultados

4.5.2. Rendimiento Energético

En la búsqueda de conseguir resultados más reales a estudios anteriores como el realizado en base a encuestas de grifos, la solución brindada por el presente estudio resulta en ser muy eficaz para conocer el comportamiento de las emisiones con relación al ciclo de marcha del transporte público en Lima Metropolitana y Callao. Estudios como el de Quiros et al. (2017) muestran la necesidad de contar con mediciones reales para no sobreestimar resultados, por otra parte Buchari (2017) menciona que estas mediciones hace mucho más precisas las metas propuestas por un país y ayuda a abordarlas de forma más realista. En ese sentido Bari & Hossain (2019) realizaron un estudio de rendimiento en un motor dual concluyendo que existe una mayor eficiencia del motor utilizando diésel frente al motor dual con quema de GNV incluso para todas las proporciones de alimentación y condiciones de operación; de forma similar García (2009) concluye que el consumo específico de combustible se incrementó significativamente siendo un 77% mayor a las altas cargas y 48% a bajas cargas en el modo Diesel-Gas Natural esto debido a que se incrementa la energía suministrada por los combustibles quemados para obtener la misma potencia demostrando que mayor inyección de GNV en el motor aumenta la necesidad energética por ende la necesidad de combustible.

En relación con el rendimiento energético, los vehículos con motor diésel presentan mayor torque y menores revoluciones por minuto a comparación del motor de los buses a gas natural, lo que da paso a un menor consumo de combustible y mayores rendimientos.

Por otro lado, los vehículos eléctricos contienen motores con mínimas partes móviles en su estructura, lo que provoca rozamientos casi inexistentes (giro del motor debido a campos electromagnéticos), por lo que presentan mayores rendimientos a comparación de los vehículos de combustión, los cuales pierden entre el 75 y 70% del rendimiento en energía calorífica generada por el rozamiento del gran número de piezas. En ese sentido Arrazola (2018) afirma que un bus eléctrico consume 6 veces menos energía que un bus a gas natural, lo cual es congruente con los resultados encontrados (un vehículo eléctrico consume 4.1 km/GJ mientras que el GNV consume en promedio 18 km/GJ es decir 4 veces más). Así mismo, resultados de Agudelo et Al. (2010), son consistentes para afirmar que aumentar la pendiente o aumentar la velocidad son condiciones que no aumentan sustancialmente el consumo de combustible en los buses a gas natural.

4.5.3. Factores de emisión

Previamente, se discutió la necesidad de tener factores de emisión más específicos para el país, por lo cual se llevó a cabo el presente estudio para determinar factores de emisión dependiendo del rendimiento de los buses de Lima Metropolitana y Callao. Los resultados de los factores de emisión muestran valores de 1.12 kgCO₂eq/km para el GNV siendo un 10% mayor frente al diésel (1.01 kgCO₂eq/km), 14% mayor frente al DB-5 (0.96 kgCO₂/km) y 84% mayor frente al bus eléctrico (0.18 kgCO₂eq/km).

Merkisz et al. (2016), afirma también que el factor de emisión del GNV (1.85 g/km) es mayor que el factor del diésel (1.56 g/km) lo cual provoca ligeramente mayores emisiones de CO₂. Por otro lado el estudio de Quiroz et al. (2017), muestra la influencia de las variables velocidad y peso en unidades de carga (no buses de transporte público). Se deduce que cuando las velocidades son similares al promedio de las rutas evaluadas, el factor de emisión sigue el mismo comportamiento, siendo superior para buses a GNV frente al diésel.

La influencia del peso evaluada mediante la cantidad de pasajeros adicionales también generó resultados importantes como la variación en 17% del factor de emisión del bus eléctrico sin pasajeros (FE sin pasajeros 0.15 kgCO₂eq/km), 13% de variación para el GNV (FE sin pasajeros 0.76 kgCO₂eq/km), 29,1% para el diésel DB-5 (FE sin pasajeros 0.66 kgCO₂eq/Km) y 30.1 % de variación para el diésel (FE sin pasajeros 0.69 kgCO₂eq/km) evidenciando que el peso afecta en mayor proporción las emisiones de diésel que frente al GNV y el eléctrico.

La relación directa de consumo adicional de combustible por cada 10 pasajeros (peso promedio de 75 kg) que suben a la unidad es de 1.37 kW/10 pasajeros; de 0.13 gal/10 pasajeros para los buses a diésel y 0.95 m³/10 pasajeros para los buses GNV. Por otro lado, la velocidad promedio en horas pico (HPM – hora punta mañana y HPT – hora punta tarde) versus horas valle (HV) también presenta un grado de impacto importante; el factor de emisión en horas pico (menor velocidad promedio) es mayor al factor de emisión en horas valle (mayor velocidad promedio) para la Ruta 107.

4.6 Utilidad de los resultados

A continuación se plantean una lista medidas y/o acciones sugeridas a partir de los resultados obtenidos así como las lecciones aprendidas de la obtención de datos de campo como parte de una estrategia para mejorar la captura, gestión y análisis de información que favorezca el proceso de toma de decisiones en las autoridades relevantes para el transporte público del país y particularmente para la ciudad de Lima con el objetivo de fortalecer los argumentos y decisiones para implementar la electromovilidad en la ciudad.

1. **Análisis del contenido de carbono en combustibles:** La evaluación del contenido de carbono en combustibles como diésel y GNV (gas natural vehicular) es esencial para mejorar la precisión y exactitud de los factores de emisión, variaciones en la composición química de los combustibles pueden influir significativamente en las emisiones, por lo que una evaluación constante permite ajustar los factores de emisión de acuerdo con las características específicas de cada lote de combustible utilizado en distintos sectores no solo pensando en su aplicación en el transporte sino también en la industria
2. **Análisis de las emisiones asociadas a la cadena de valor:** Evaluar el factor de emisión del gas natural y del diésel considerando toda la cadena de valor, y no solo la quema de estos combustibles bajo un enfoque "tank to wheel", es crucial para obtener una visión completa y precisa de su impacto ambiental. Este enfoque integral, conocido como "well to wheel", abarca todas las etapas del ciclo de vida del combustible, desde la extracción, producción, procesamiento y transporte, hasta su distribución y consumo final. Al considerar todas las etapas de la cadena de valor se logra una visión completa que puede hacer variar significativamente el factor de emisión por defecto. Esta evaluación holística permite a los responsables de la toma de decisiones diseñar estrategias de

reducción de emisiones más efectivas y basadas en datos completos, promueve la transparencia y la responsabilidad en toda la cadena de suministro y contribuye a una comparación más justa y precisa entre diferentes tipos de combustibles como lo que sucede con el factor de emisión de la electricidad que considera toda las emisiones desde la generación mientras que en el caso del Diesel y el GNV solo se considera las emisiones del proceso de combustión.

3. **Centro de Vigilancia y Monitoreo:** Un centro de este tipo proporciona datos en tiempo real sobre el flujo de vehículos, los patrones de congestión y las zonas con mayor demanda de transporte, lo que permite una planificación más precisa y eficiente de la infraestructura necesaria para soportar vehículos eléctricos. Con esta información, es posible identificar las rutas y áreas con mayor potencial para la instalación de estaciones de carga, asegurando que estén ubicadas en lugares estratégicos que maximicen su uso y accesibilidad. Además, el monitoreo continuo del tráfico permite evaluar el impacto de la electromovilidad en la reducción de la contaminación y en la mejora de la calidad del aire en distintas zonas de la ciudad.
4. **Modificación de la política Nacional:** Como medida para mejorar la obtención de datos, es importante reconocer que la política nacional de promoción del GNV en el transporte público de Lima Metropolitana es una medida que no aporta sino por el contrario va en contra de la lucha contra el cambio climático y los compromisos nacionalmente determinados (NDC) limitando por consecuencia la identificación y análisis de datos reales de operación del sistema

V. CONCLUSIONES

1. Los resultados de los factores de emisión muestran valores de 1.12 kgCO₂eq/km para el GNV siendo un 10% mayor frente al diésel (1.01 kgCO₂eq/km), 14% mayor frente al DB-5 (0.96 kgCO₂/km) y 84% mayor frente al bus eléctrico (0.18 kgCO₂eq/km) demostrando así que el GNV es la opción energética que mayores emisiones genera por kilómetro y que la movilidad eléctrica es por consecuencia la opción evaluada de menores emisiones asociadas para usarse como principal energético para el transporte público de la ciudad de Lima Metropolitana.
2. En relación con el rendimiento energético, se obtuvieron valores de 273.53 Km/Gj para los vehículos propulsado con electricidad, 82.43 Km/Gj para los vehículos propulsados en el escenario Diesel BD5 y 76.01 Km/Gj en el escenario Diesel al 100% siendo el GNV el energético de menor rendimiento energético con un valor de 54.68 Km/GJ demostrando así que un motor eléctrico recorre mayor cantidad de distancia por una misma unidad energética comparable que sus competidores (Diesel, DB5 y GNV) en el ámbito de Lima Metropolitana.
3. A partir de los resultados se proponen un grupo de medidas en la sección 4.6 para mejorar la toma de datos y la lectura o interpretación de los mismos; de las medidas propuestas para la recolección, gestión y análisis de datos del transporte público; el centro de control y observación es de las opciones más útiles y atractivas para el levantamiento de datos en tiempo real y la generación de una base de datos sólida que permita evaluar con mayor precisión la operación de buses eléctricos en cada una de las diferentes rutas en la ciudad así como sus interconexiones. Mientras que el cambio de política nacional de fomento del gas natural vehicular en el transporte público de Lima contribuye a una mejor toma de decisiones y utilidad de los resultados

VI. RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenido en el presente trabajo se presentan las siguientes recomendaciones:

1. La electromovilidad como opción tecnológica para el transporte público de Lima es la solución más efectiva para reducir los gases de efecto invernadero causante del cambio climático contribuyendo así con los compromisos NDC del país siendo necesario por consiguiente modificar la política nacional que viene impulsando el uso de GNV en el transporte público; los factores de emisión demuestran que fomentar el GNV en el transporte no reduce sino por el contrario aumentar los GEI emitidos del sector.
2. Este trabajo determinó factores en base a las emisiones por combustión del diésel o GNV (bajo el enfoque “tank to wheel”, es decir, desde que se carga de combustible hasta que este se transforma en energía mecánica), se recomienda hacer la cuantificación de emisiones generadas desde su extracción de la naturaleza (pozo) hasta su llegada al grifo (tanque), es decir, bajo el enfoque “well to tank”, donde se consideraría las emisiones de producción, transporte en ductos y emisiones fugitivas. Ello con el fin de hacerlo más comparativo en relación a las emisiones de los buses eléctrico, donde si se considera el enfoque “well to tank”. Esto significaría que es seguro que los beneficios de la electromovilidad en términos ambientales resultarían mayores a los determinados en este trabajo.
3. El avance tecnológico y digitalización como la aparición de la inteligencia artificial, el internet de las cosas, el *Big Data* entre otras tendencias continúan desarrollando soluciones cada vez más eficientes y gran utilidad para generar ahorros de combustible y eficiencia; en el transporte público es posible hoy monitorear por GPS las velocidades promedio, los ciclos de marcha entre otros elementos que permitan observar y analizar los rendimientos de las unidades, las velocidades promedio de las vías y el flujo de los arcos viales permitiendo tomar mejores y mayores decisiones sobre la planificación del sector.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, J., Moreno, R., & Pérez, J. F. (2010). Desempeño dinámico y energético de un autobús operando con gas natural vehicular. *Facultad de Ingeniería Universidad Antioquía*, 51, 72-80. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302010000100008&script=sci_abstract&tlng=es
- Arrazola, I. (2018). *Estudio comparativo de un autobús mediante simulación: propulsión eléctrica frente a gas natural*. Tesis de grado, Universidad Carlos II de Madrid, Madrid. Recuperado de https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29547/TFG_Ivan_Arrazola_Lorden.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bari, S., & Hossain, S. N. (2019). Performance of a diesel engine run on diesel and natural gas in dual-fuel mode of operation. *Energy Procedia*, 160, 215-222. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.13>
- Buchari, E. (2017). The advantage of calculating emission reduction with local emission factor in South Sumatera region. *AIP Conference Proceedings*, 1903, 060014. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/321076104_The_advantage_of_calculating_emission_reduction_with_local_emission_factor_in_South_Sumatera_region
- Delgado, O., & Muncrief, R. (2015). *Assessment of heavy-duty Natural Gas Vehicle emissions: Implications and policy recommendations*. International Council on Clean Transportation. Recuperado de https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_NG-HDV-emissions-assessmnt_20150730.pdf
- García, J. (2009). Análisis comparativo del desempeño mecánico, energético y ambiental de un motor Diesel en funcionamiento Mixto Diesel – gas natural. Recuperado de: <https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://manglar.uninorte.edu.co/bitstream/handle/10584/9075/91452.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- IPCC. (2006). Directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.
- IPCC (2014). Anexo II: Glosario [Mach, K.J., S. Planton y C. von Stechow (eds.)]. En: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, págs. 127-141. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/03/AR5_SYR_Glossary_es.pdf
- IPCC. (2022). *Sexto Informe de Evaluación del IPCC. Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019*. Guidebook. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Instituto Mexicano de Transporte. (2018). *Desarrollo de metodología para la estimación de los vehículos - kilómetros recorridos anualmente, a nivel nacional*. Secretaria de comunicaciones y transportes. Sanfandila.
- Likhanov, V. A., & Lopatin, O. P. (2019). *Improving the enviromental performance of a diesel engine using natural gas and exhaust gas recirculation*. Vyatka State Agricultural Academy. Russian Federation: IOP publishing. doi:10.1088/1742-6596/1399/5/055020
- Merkisz, J., Fué, P., Lijewski, P., & Pielecha, J. (2016). Actual emissions from urban buses powered with diesel and gas engines. *6th Transport Research Arena, 14*, págs. 3070-3078. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516304598>
- MINEM. (2021). *Principales indicadores del sector eléctrico a nivel nacional*. Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Electricidad. Recuperado de [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/1%20Cifras%20preliminares%20del%20Sector%20Electrico%20-%20Diciembre%202020%20-%20Ver%200\(1\).pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/1%20Cifras%20preliminares%20del%20Sector%20Electrico%20-%20Diciembre%202020%20-%20Ver%200(1).pdf)
- MINAM. (2014a). *Guía N° 4: Elaboración del Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero - Sector Desechos. Categoría: Disposición de Residuos Sólidos*.

- MINAM. (2014b). INGEI 2014: Inventario nacional de gases de efecto invernadero del año 2014 y actualización de las estimaciones de los años 2000, 2005, 2010 y 2012. Recuperado de <https://infocarbono.minam.gob.pe/>
- Speirs, J. et Al. (2020). Combustible de gas natural y emisiones de gases de efecto invernadero en camiones y barcos. DOI: 10.1088/2516-1083/ab56af
- Quiros, D., Smith, J., Thiruvengadam, A., Huai, T., & Hu, S. (2017). Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid, and conventional diesel on-road trucks during freight transport. *Atmospheric Environment*, 168, 36-45. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.066>.
- Zegarra, J., Sulén, F., & Bautista, L. (2006). *Determinantes de la conversión de vehículos a Gas Licuado de Petróleo y el diseño de políticas de limpieza del aire en el Centro Histórico de Trujillo*. Consorcio de Investigación Económica y Social-CIES. Recuperado de <http://www.cies.org.pe/sites/default/files/investigaciones/determinantes-de-la-conversion-de-vehiculos-a-gas-licuado-de-petroleo.pdf>